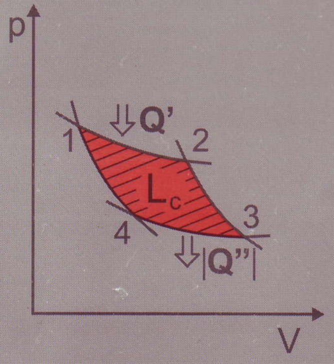
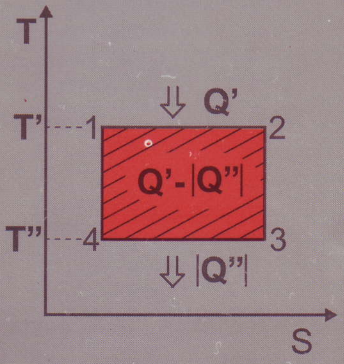
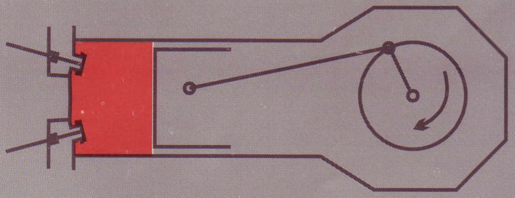
Florian IVAN Rodica NICULESCU

TERMODINAMICĂ TEHNICĂ

Teorie. Aplicații. Teste grilă







$$\eta_c = 1 - \frac{T''}{T'}$$

Editura Universității din Pitești
2005

Florian IVAN
prof.univ.dr.ing

Rodica NICULESCU
şef lucrări dr.ing

TERMODINAMICĂ TEHNICĂ

Teorie – Aplicații – Teste grilă

Editura Universității din Piteşti
2005

CUVÂNT CĂTRE STUDENȚI

Într-o lume bulversată, flămândă să dispună de *„totul despre..”* (rețineți să dispună, adică nu neapărat *să afle*, *să cunoască*, ci să aibă acest sentiment al proprietății absolute şi complete, inclusiv asupra cunoştințelor!) autorii doresc să vă ofere prin această lucrare o clipă de *respiro intelectual activ,* sau mai de grabă o lectură pusă sub semnul dictonului latin *„non multa, sad multum”*.

Elaborată din dorința asigurării unei pregătiri formative complexe şi moderne a studenților de la specializările cu profil mecanic şi electromecanic din facultățile tehnice, prezenta lucrare cuprinde o sinteză a teoriei cursului de Termodinamică Tehnică însoțită de aplicații şi teste grilă pentru evaluarea însuşirii cunoştințelor. Rod al unei experiențe didactice de mai mulți ani, lucrare se constituie ca un ghid util pentru studenți, lucrarea se constituie ca un ghid pentru studenți, atât în ceea ce priveşte activitatea de seminar cât şi în pregătirea examenelor la această disciplină.

Pentru o însuşire temeinică a cunoştințelor studenților le recomandăm următoarele:

a) – să se studieze aprioric materia predată la curs;
b) – să se asigure continuitatea în urmărirea cursului, seminarului şi laboratorului;
c) – să se parcurgă cu meticulozitate conținutul primului capitol referitor la unitățile de măsură;
d) – să aprofundeze înțelegerea semnificațiilor relațiilor de calcul şi a mărimilor care intervin în acestea;
e) – să rezolve problemele date ca model de soluționare la fiecare capitol;
f) – să rezolve individual problemele propuse spre rezolvare;
g) – să-şi autoevalueze însuşirea cunoştințelor prin rezolvarea integrală a testelor grilă aferente fiecărui capitol al lucrării.

Nutrim speranța că lucrarea de față va constitui un sprijin real pentru studenți în pregătirea examenului la disciplina Termodinamică Tehnică.

Nu în ultimul rând, apreciem că lucrarea va fi utilă şi cadrelor didactice care coordonează activitatea de seminar de la care autorii aşteaptă sugestii şi propuneri în vederea îmbunătățirii formei şi fondului acesteia.

Piteşti: 22 – februarie 2005 Autorii.

CUPRINS

NOTAȚII UTILIZATE

A	Arie, m^2
c	Căldura specifică masică, $J/kg \cdot K$
c_e	Consum specific efectiv, $g/kW \cdot h$
c_n	Căldura specifică politropică, $J/kg \cdot K$
c_p	Căldura specifică masică la presiune constantă, $J/kg \cdot K$
c_V	Căldura specifică masică la volum constant, $J/kg \cdot K$
c_N	Căldura specifică raportată la 1 m_N^3, $J/m_N^3 \cdot K$
C	Capacitatea calorică, J/K
$\overline{c}$	Consumul mediu de combustibil, l/100 km, USgal/milă
C_h	Consum orar de combustibil, kg/h
C_M	Căldura specifică molară, $J/kmol \cdot K$
C_{M_V}	Căldura specifică molară la volum constant, $J/kmol \cdot K$
C_{M_p}	Căldura specifică molară la presiune constantă, $J/kmol \cdot K$
D	Diametru (alezaj), m
e	Energie specifică, J/kg
E	Energie, J
E_c	Energie cinetică, J
E_p	Energie potențială, J
F	Forța, N
g	Accelerația gravitațională, m/s^2 $\left(g = 9{,}807 \ \ m/s^2\right)$
g_i	Participația masică
h	Entalpie specifică, J/kg
H	Entalpie, J
H_i	Putere calorică inferioară a combustibilului, J/kg
k	Exponent adiabatic
l	Lucru mecanic specific, absolut, J/kg
l_d	Lucru mecanic de dislocare specific, J/kg

l_t	Lucru mecanic tehnic specific, J/kg
L	Lucru mecanic absolut, J
L_d	Lucru mecanic de dislocare, J
L_t	Lucru mecanic tehnic, J
m	Masă, kg
$\dot{m}$	Debit masic, kg/s
M	Masă molară, $kg/kmol$
n	Exponent politropic
n_m	Turația, $rot/\min$
N_A	Numărul lui Avogadro, $N_A = 6023 \cdot 10^{26}$ $molec/kmol$
p	Presiune, Pa
p_i	Presiune parțială, Pa
p_0	Presiune atmosferică, Pa
p_N	Presiune la starea fizică normală,($p_N = 1{,}013 \cdot 10^5$ Pa), Pa
p_n	Presiune la starea tehnică normală,($p_n = 0{,}9807 \cdot 10^5$ Pa), Pa
P	Putere, W
q	Căldură transferată pe unitatea de masă, J/kg
$\dot{q}$	Flux unitar de căldură, W/m^2
Q	Căldură, J
$\dot{Q}$	Flux de căldură, W
r_i	Participație volumică
R	Constanta gazului, $J/kg \cdot K$
R_M	Constanta universală a gazelor,($R_M = 8314{,}3$ $J/kmol \cdot K$); $J/kmol \cdot K$
s	Entropie specifică, $J/kg \cdot K$
S	Entropie, J/K
t	Temperatura, $^\circ C$
t_n	Temperatura la starea tehnică normală, $(t_n = 20^\circ C)$, $^\circ C$
T	Temperatura termodinamică, K
T_N	Temperatura la starea fizică normală, $(T_N = 273{,}15\ K)$, K

u	Energia internă specifică, J/kg
U	Energia internă, J
v	Volum specific, m^3/kg
V	Volum, m^3
$\dot{V}$	Debit volumic, m^3/s
V_M	Volumul molar, $m^3/kmol$
$V_{M,N}$	Volumul molar normal, $\left(V_{M,N} = 22{,}414\ m_N^3/kmol\right)$, $m_N^3/kmol$
w	Viteză, m/s

Simboluri din alfabetul grec

η	Randament Viscozitate dinamică, $Pa \cdot s$
ρ	Densitate, kg/m^3
ν	Numărul de kmol Viscozitate cinematică
ε_f	Eficiența frigorifică
μ	Eficiența calorică (pentru pompe de căldură)
φ	Eficiența instalației mixte (frigorifice şi calorifice)
τ	Timpul, s
λ	Conductivitate termică, $W/m \cdot K$

CAPITOLUL 1

MĂRIMI ŞI SISTEME DE UNITĂȚI DE MĂSURĂ

1.1. Considerații teoretice

Pentru a caracteriza un obiect, proces sau fenomen, se iau în considerație anumite însuşiri ale acestora cărora li se atribuie o denumire. Dacă o astfel de însuşire poate fi măsurată, aceasta reprezintă o mărime.

În orice procedeu de măsurare, pentru a evalua cât reprezintă o porțiune dintr-o mărime dată, se compară această porțiune cu o anumită parte etalon de aceeaşi natură, această parte se consideră egală cu unitatea şi se numeşte unitate de măsură.

Utilizarea unui anumit grup de unități de măsură conduce la ceea ce se numeşte un sistem de unități de măsură.

Sistemele de unități destinate pentru măsurarea diferitelor mărimi, se diferențiază după modul de grupare a mărimilor :

- grupe de mărimi *fundamentale*, ale căror unități de măsură se aleg independent, prin indicarea reprezentării lor concrete ;
- grupe de mărimi *secundare*, pentru care unitățile de măsură rezultă pe baza relațiilor care le leagă de mărimile fundamentale.

Unitățile de măsură, mărimi de aceeaşi speță cu mărimile de măsurat se aleg în mod arbitrar ca elemente de comparație şi se grupează astfel :

- unități *fundamentale*, unități ale mărimilor fundamentale, se aleg arbitrar, pentru a servi ca bază la formarea sistemului respectiv ;
- unități *derivate*, unitățile mărimilor secundare, se deduc din ecuațiile lor de definiție, în care mărimile fundamentale se înlocuiesc direct cu unitățile lor;
- unități *suplimentare*, unități în afara sistemelor, sunt unități stabilite convențional, care nu se deduc din ecuațiile de definiție ale mărimilor pe care le măsoară şi deci, sunt independente de unitățile fundamentale ale sistemelor.

În anul 1960, cea de-a XI-a Conferință generală de măsuri şi greutăți a adoptat sistemul de unități de măsură care are la bază şapte mărimi fundamentale (Tab. 1.1.) denumindu-l Sistemul Internațional de Unități de măsură (S.I.).

În termodinamică se utilizează Sistemul Internațional de Unități de măsură (S.I.), iar în trecut s-a utilizat Sistemul Tehnic de unități de măsură (S.T.). Şi astăzi se mai utilizează unele dintre unitățile de măsură ale acestui sistem. În tabelul 1.2. sunt prezentate unitățile fundamentale de măsură ale Sistemului tehnic.

În tabelul 1.4. sunt prezentate relații de legătură între S.I., S.T. şi alte sisteme de unități de măsură.

Tabel 1.1.
Mărimile şi unităţile de măsură fundamentale ale Sistemului Internaţional

Nr. crt.	Mărimea fundamentală	Denumirea	Simbol	Unitatea fundamentală Definiţie
0	1	2	3	4
1.	Lungime	Metru	m	Metrul este lungimea egală cu 1650763,7 : lungimi de undă în vid ale radiaţiei care corespund tranziţiei între nivelele $2p_{10}$ şi $5d_5$ ale atomului de kripton 86.
2.	Masă	Kilogram	kg	Kg este masa „kilogramului prototip internaţional" adoptat ca unitate de măsură a masei, de Conferinţa Generală de Măsuri şi Greutăţi din 1889.
3.	Timp	Secundă	s	Secunda este durata a 9192631770 perioade ale radiaţiei corespunzătoare tranziţiei între cele două nivele hiperfine ale stării fundamentale a atomului de cesiu 133.
4.	Intensitatea curentului electric	Amper	A	Amperul este intensitatea unui curent electric constant, care menţinut în două conductoare paralele rectilinii, de lungime infinită şi de secţiune circulară neglijabilă, aşezate în vid, la o distanţă de 1 metru unul de altul ar produce între aceste conductoare o forţă de $2 \cdot 10^{-7} N$ pe o lungime de 1m.
5.	Temperatura termodinamică	Kelvin	K	Kelvinul, unitate de temperatură termodinamică este fracţiunea $1/273{,}16$ din temperatura termodinamică a punctului triplu al apei.

continuare **Tabel 1.1.**

0	**1**	**2**	**3**	**4**
6.	Cantitate de substanță	Mol	mol	Molul este cantitatea de substanță a unui sistem care conține atâtea entități elementare câți atomi există în $0{,}012\ kg\ C12$. Entitățile elementare (atom, molecule, ioni, electroni, alte particule sau grupări specifice de astfel de particule) trebuie să fie menționate ori de câte ori se utilizează molul.
7.	Intensitatea luminoasă	Candela	cd	Candela este intensitatea luminoasă într-o direcție dată a unei surse care emite o radiație monocromatică cu frecvența de $540 \cdot 10^{12}$ hertzi și a cărei intensitate energetică în direcția respectivă este de $1/683\ watt$ pe steradiani.

Tabel 1.2.

Mărimi și unități fundamentale de măsură ale ST

Nr.	**Mărimea**		**Unitatea de măsură**	
	Denumirea	**Simbol**	**Denumirea**	**Simbol**
1.	Lungimea	L	Metru	M
2.	Forța	F	Kilogram forță	kgf
3.	Timpul	τ	Secunda	s
4.	Intensitatea curentului electric	I	Amper	A
5.	Temperatura termodinamică	T	Kelvin	K
6.	Cantitatea de substanță	n	Mol	mol
7.	Intensitatea luminoasă	ϕ	Candelă	cd

Tabel 1.3.

Unităţi derivate ale sistemului internaţional

Nr. crt.	**Mărimea derivată**	**Unitatea fundamentală**		
		Denumirea	**Simbol**	**Definiţie**
0	**1**	**2**	**3**	**4**
1.	Arie	Metru pătrat	m^2	Aria unui pătrat cu latura de un metru.
2.	Volum	Metru cub	m^3	Volumul unui cub cu latura de un metru.
3.	Viteză	Metru pe secundă	m/s	Viteza unui punct în mişcare rectilinie şi uniformă care parcurge distanţa de un metru într-o secundă.
4.	Viteza unghiulară	Radian pe secundă	rad/s	Viteza unghiulară a unui punct în mişcare circulară uniformă, al cărui vector de poziţie descrie un unghi la centru de un radian, într-o secundă.
5.	Acceleraţie	Metru pe secundă la pătrat	m/s^2	Acceleraţia unui punct în mişcare rectilinie uniform variată, a cărui viteză variază cu un metru pe secundă într-o secundă.
6.	Acceleraţie unghiulară	Radian pe secundă la pătrat	rad/s^2	Acceleraţia unghiulară a unui punct în mişcare circulară uniform variată, a cărui viteză unghiulară variază cu un radian pe secundă, într-o sec.
7.	Densitate (masă volumică)	Kilogram pe metru cub	kg/m^3	Masa volumică a unui corp omogen cu volumul de un metru cub, a cărui masă este de un kilogram.
8.	Forţă	Newton	N	Forţa, care aplicată unui corp cu masa de un kilogram îi imprimă o acceleraţie de un metru pe secundă la pătrat.

continuare **Tabel 1.3.**

0	**1**	**2**	**3**	**4**
9.	Presiune; tensiune mecanică	Pascal	Pa	Pascalul este presiunea care acționând uniform pe o suprafață plană cu aria de un metru pătrat, exercită perpendicular pe această suprafață o forță totală de un newton.
10.	Viscozitate dinamică	Pascal secundă	$Pa \cdot s$	Pascalul-secundă este viscozitatea dinamică a unui fluid omogen în care mişcarea rectilinie uniformă a unei suprafețe plane cu aria de un metru pătrat dă naştere unei forțe de frecare de 1 N, când diferența de viteză dintre două plane paralele, situate la distanța de 1 metru unul față de altul este de 1 m/s.
11.	Viscozitate cinematică	Metru pătrat pe secundă	m^2/s	Metrul pătrat pe secundă este viscozitatea cinematică a unui fluid care are masa volumică de 1 kg/m^3 şi viscozitatea dinamică de 1 $Pa \cdot s$.
12.	Lucru mecanic, energie, cantitate de căldură	Joule	J $m^2 \cdot kg/s^2$	Lucrul mecanic efectuat de o forță de 1 newton, al cărui punct de aplicație se deplasează cu un metru în direcția forței.
13.	Putere	Watt	W $m^2 \cdot kg/s^3$	Puterea corespunzătoare transferului de energie de un joule, care se produce timp de o secundă.

continuare **Tabel 1.3.**

0	1	2	3	4
14.	Entropie	Joule pe kelvin	J/K	Creşterea entropiei unui corp căruia i se transmite izoterm şi reversibil, la temperatura termodinamică de n kelvini, cantitatea de căldură de n jouli
15.	Căldură masică (specifică)	Joule pe kilogram kelvin	$J/kg \cdot K$	Căldura masică a unui corp cu masa de 1 kg a cărui temperatură termodinamică creşte cu 1 kelvin când primeşte o cantitate de căldură de 1 joule.
16.	Conductivitate termică	Watt pe metru kelvin	$W/m \cdot K$	Conductivitatea termică a unui corp omogen şi izotrop, prin a cărui suprafață de 1 metru pătrat trece un flux termic de 1 watt, la o variație a temperaturii, în direcția normalei la suprafața izotermă de 1 kelvin pe m.

Tabel 1.4.

Relații de transformare a unităților de măsură

1.4.1. Lungime

	m	in	ft
$1\ m =$	1	39,37	3,281
$1\ in =$	0,0254	1	$1/12$
$1\ ft =$	0,3048	12	1

1.4.2. Suprafață

	m^2	in^2	ft^2
$1\ m^2 =$	1	1550	10,761
$1\ in^2 =$	$6{,}45 \cdot 10^{-4}$	1	$1/144$
$1\ ft^2 =$	0,0929	144	1

1.4.3. Volum

	m^3	in^3	ft^3
$1\ m^3 =$	1	61024	35,31
$1\ in^3 =$	$16{,}39 \cdot 10^{-6}$	1	$1/1728$
$1\ ft^3 =$	0,0283	1728	1

1.4.4. Volum specific

	m^3/kg	in^3/lb	ft^3/lb
$1\ m^3/kg =$	1	27680	16,02
$1\ in^3/lb =$	$3{,}613 \cdot 10^{-5}$	1	$5{,}787 \cdot 10^{-4}$
$1\ ft^3/lb =$	0,06242	1728	1

1.4.5. Masa

	kg	lb
$1\ kg =$	1	2,2046
$1\ lb =$	0,4536	1

1.4.6. Densitate

	kg/m^3	lb/in^3	lb/ft^3
$1\ kg/m^3 =$	1	$3{,}613 \cdot 10^{-5}$	0,06243
$1\ lb/in^3 =$	27680	1	1728
$1\ lb/ft^3 =$	16,02	$5{,}787 \cdot 10^{-4}$	1

1.4.7. Forța

	N	kgf	lbf
$1\ N =$	1	0,102	0,2248
$1\ kgf =$	9,81	1	2,2046
$1\ lbf =$	4,448	0,4536	1

1.4.8. Presiune

	Pa $\left(N/m^2\right)$	bar	atm	kgf/m^2	at $\left(kgf/cm^2\right)$	$mm\ H_2O$ $\left(kgf/m^2\right)$	$mm\ Hg$ $\left(torr\right)$	lbf/in^2 $\left(psi\right)$
$1\ Pa\left(N/m^2\right)=$	1	10^{-5}	$9{,}869\cdot10^{-6}$	0,102	$1{,}02\cdot10^{-5}$	0,102	$7{,}5\cdot10^{-3}$	$1{,}45\cdot10^{-4}$
$1\ bar =$	10^5	1	$9{,}869\cdot10^{-1}$	$1{,}02\cdot10^4$	1,02	$1{,}02\cdot10^4$	750	14,5
$1\ atm =$	$1{,}013\cdot10^5$	1,013	1	10336	1,0336	10336	760	14,6959
$1\ kgf/m^2 =$	9,81	$9{,}81\cdot10^{-5}$	$9{,}678\cdot10^{-5}$	1	10^{-4}	1	0,07355	$14{,}22\cdot10^{-4}$
$1\ at\left(kgf/cm^2\right)=$	$9{,}81\cdot10^4$	0,981	$9{,}678\cdot10^{-1}$	10^4	1	10^4	735,5	14,22
$1\ mm\ H_2O =$ $\left(1\ kgf/m^2 =\right)$	9,81	$9{,}81\cdot10^{-5}$	$9{,}678\cdot10^{-5}$	1	10^{-4}	1	0,07355	$14{,}22\cdot10^{-4}$
$1\ mm\ Hg =$ $\left(1\ torr =\right)$	133,3	$1{,}33\cdot10^{-3}$	$1{,}315\cdot10^{-3}$	13,6	$13{,}6\cdot10^{-4}$	13,6	1	0,01933
$1\ lbf/in^2\left(psi\right)=$	6895	0,06895	0,068046	703,1	0,07031	703,1	51,715	1

1.4.9. Viscozitatea dinamică

	$(N\cdot s)/m^2$	$(kgf\cdot s)/m^2$	$(lbf\cdot s)/tf^2$
$1\ (N\cdot s)/m^2 =$	1	0,102	2,0885
$1\ (kgf\cdot s)/m^2 =$	9,81	1	0,2018
$1\ (lbf\cdot s)/tf^2 =$	17,88	4,882	1

1.4.10. Viscozitate cinematică

	m^2/s	in^2/s
$1\ m^2/s =$	1	1550
$1\ in^2/s =$	$6{,}452\cdot 10^{-4}$	1

1.4.11. Energie, lucru mecanic, căldură

	J	kWh	$kgf\cdot m$	Btu	cal
$1\ J =$	1	$2{,}777\cdot 10^{-7}$	0,102	$9{,}478\cdot 10^{-4}$	0,239
$1\ kWh =$	$3600\cdot 10^{3}$	1	$3{,}671\cdot 10^{5}$	3412	$860\cdot 10^{3}$
$1\ kgf\cdot m =$	9,81	$2{,}724\cdot 10^{-6}$	1	$9{,}295\cdot 10^{-3}$	2,3423
$1\ Btu =$	1055	$2{,}931\cdot 10^{-4}$	107,6	1	252
$1\ cal =$	4,187	$1{,}163\cdot 10^{-6}$	0,427	$3{,}97\cdot 10^{-3}$	1

1.4.12. Putere, flux de căldură

	W	$(kgf\cdot m)/s$	$kcal/h$	Btu/h	CP	hp
$1\ W =$	1	0,102	0,860	3,412	$1{,}36\cdot 10^{-3}$	$1{,}341\cdot 10^{-3}$
$1\ (kgf\cdot m)/s =$	9,81	1	8,432	33,46	$1{,}333\cdot 10^{-2}$	$1{,}315\cdot 10^{-2}$
$1\ kcal/h =$	1,163	0,1185	1	3,968	$1{,}581\cdot 10^{-3}$	$1{,}5596\cdot 10^{-3}$
$1\ Btu/h =$	0,293	0,0299	0,252	1	$3{,}983\cdot 10^{-4}$	$3{,}929\cdot 10^{-4}$
$1\ CP =$	735,5	75	632,42	2509,53	1	0,9863
$1\ hp =$	745,7	76,040	641,19	2544,33	1,014	1

.

1.4.13. Căldura specifică

	$J/(kg\cdot^\circ C)$	$kcal/(kgf\cdot^\circ C)$	$Btu/(lb\cdot^\circ F)$
$1\ J/(kg\cdot^\circ C)=$	1	$2{,}39\cdot10^{-4}$	$2{,}39\cdot10^{-4}$
$1\ kcal/(kgf\cdot^\circ C)=$	4187	1	1
$1\ Btu/(lb\cdot^\circ F)=$	4187	1	1

1.4.14. Echivalența pe diferite scări a unui grad de temperatură

Scara de temperatură	**Simbol**	K	$^\circ C$	$^\circ \mathrm{Re}$	$^\circ F$	$^\circ R$
Kelvin	K	1	1	$4/5$	$9/5$	$9/5$
Celsius	$^\circ C$	1	1	$4/5$	$9/5$	$9/5$
Reaumur	$^\circ \mathrm{Re}$	$5/4$	$5/4$	1	$9/4$	$9/4$
Fahrenheit	$^\circ F$	$5/9$	$5/9$	$4/9$	1	1
Rankin	$^\circ R$	$5/9$	$5/9$	$4/9$	1	1

1.4.15. Valorile temperaturilor punctelor caracteristice

Punctul caracteristic	K	$^\circ C$	$^\circ \mathrm{Re}$	$^\circ F$	$^\circ R$
Zero absolut	0	-273,15	-218,52	-459,67	0
Punctul de îngheț al apei pure	273,15	0	0	+32	491,67
Punctul triplu al apei	273,16	+0,01	+0,008	+32,0183	491,688
Punctul de fierbere a apei	373,15	+100	-80	+212	671,67

1.4.16. Relaţii de transformare a temperaturilor exprimate în diferite scări

	$T[K]$	$t_C[^\circ C]$	$t_{\mathrm{Re}}[^\circ \mathrm{Re}]$	$t_F[^\circ F]$	$t_R[^\circ R]$
Temperatura în grade kelvin, $T[K]$	T	$T-273{,}15$	$\frac{4}{5}(T-273{,}15)$	$\frac{9}{5}(T-273{,}15)+32$	$\frac{9}{5}T$
Temperatura în grade Celsius, $t_C[^\circ C]$	$t_C+273{,}15$	t_C	$\frac{4}{5}t_C$	$\frac{9}{5}t_C+32$	$\frac{9}{5}t_C+491{,}67$
Temperatura în grade Reaumur, $t_{\mathrm{Re}}[^\circ \mathrm{Re}]$	$\frac{5}{4}t_{\mathrm{Re}}+273{,}15$	$\frac{5}{4}t_{\mathrm{Re}}$	t_{Re}	$\frac{9}{5}t_{\mathrm{Re}}+32$	$\frac{9}{4}t_{\mathrm{Re}}+491{,}67$
Temperatura în grade Fahrenheit, $t_F[^\circ F]$	$\frac{5}{9}(t_F-32)+273{,}15$	$\frac{5}{9}(t_F-32)$	$\frac{4}{9}(t_F-32)$	t_F	$t_F+459{,}67$
Temperatura în grade Rankin, $t_R[^\circ R]$	$\frac{5}{9}t_R$	$\frac{5}{9}(t_R-491{,}67)$	$\frac{4}{9}t_R-491{,}67$	$t_R-459{,}67$	t_R

1.4.17. Echivalența dintre $kmol$, m_N^3 și kg

Unitatea	Simbol	$kmol$	m_N^3	kg
Kilomol	$kmol$	1	22,414	M
Metru cub normal	m_N^3	$1/22,414$	1	$M/22,414$
Kilogram	kg	$1/M$	$22,414/M$	1

1.2. Probleme rezolvate

1.2.1. Un automobil cu masa totală m=1500 kg se deplasează cu viteza $w = 108\ km/h$. Să se determine masa automobilului și energia cinetică a acestuia. Calculele se vor efectua în SI și în ST.

Rezolvare:

Energia cinetică a automobilului aflat în mişcare este :

$$E_c = \frac{mw^2}{2}$$

w - fiind viteza de deplasare a centrului său de greutate :

$$w = 108\ km/h = 108 \cdot \frac{1000\ m}{3600\ s} = 30\ m/s$$

Efectuând calculele în SI, obținem :

$$E_c = \frac{mw^2}{2} = \frac{1500 \cdot 30^2}{2} = 675 \cdot 10^3\ J = 675\ kJ$$

La efectuarea calculelor în ST se ține seama că 1kgf = 9,807N = 9,81N adică: $1kgfm = 9,81\ Nm = 9,81\ J$

Ca urmare:

$$E_c = 675\ kJ = \frac{675 \cdot 10^3}{9,81} kgfm = 68807\ kgfm$$

1.2.2. Măsurând cu ajutorul unui manometru presiunea din cilindrul unui motor Diesel în procesul de comprimare s-a găsit valoarea $p = 0,5\ MPa$. Totodată, în carterul cilindrilor manometrul indică o presiune

$p_c = 1{,}2\ bar$ **. Ştiind că alezajul (diametrul pistonului) este** $D = 76\ mm$ **să se determine forța exercitată asupra pistonului efectuând calculele în SI şi ST.**

Rezolvare :
Dacă A este aria secțiunii pistonului, atunci forța exercitată asupra sa este :

$$F = A \cdot (p - p_c) = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (p - p_c)$$

Efectuând calculele în SI :

$$p = 0{,}5\ MPa = 0{,}5 \cdot 10^6\ Pa = 5 \cdot 10^5\ Pa = 5\ bar$$

$$p_c = 1{,}2\ bar = 1{,}2 \cdot 10^5\ Pa$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot \left(76 \cdot 10^{-3}\right)^2}{4}\ m^2 = 4{,}534 \cdot 10^{-3}\ m^2$$

$$F = 4{,}534 \cdot 10^{-3} \cdot \left(5 \cdot 10^5 - 1{,}2 \cdot 10^5\right) = 4{,}534 \cdot 10^2 \cdot 3{,}8 = 1723\ N$$

Efectuând calculele în ST :

$$F = 1723\ N = \frac{1723}{9{,}81}\ kgf = 175{,}6\ kgf$$

1.2.3. Un atelier de vulcanizare pentru pneuri auto dispune de un manometru cu plaja de măsurare $0 - 10\ bar$**. Precizați dacă se poate măsura o presiune** $p_m = 80\ psi$**. Exprimați această valoare în** Pa, bar, atm, $torr$, at, kgf/cm^2, $m\ col\ H_2O$**.**

Rezolvare :
Se ştie că :

$$1\ psi = \frac{1\ lbf}{in^2}$$

$$1\ lb = 453{,}6\ g = 0{,}4536 \cdot kg$$

$$1\ lbf = 0{,}4536 \cdot 9{,}81\ N = 4{,}4498\ N$$

$$1\ in = 25{,}4\ mm = 0{,}0254\ m = 2{,}54 \cdot 10^{-2}\ m$$

Prin urmare :

$$1\ psi = \frac{4{,}4498}{\left(2{,}54\cdot 10^{-2}\right)^2}\ \frac{N}{m^2}(Pa) = 6897\ Pa = 6{,}897\ kPa$$

iar : $p_m = 80\ psi = 80\cdot 6{,}897\cdot 10^3\ Pa = 551{,}76\cdot 10^3\ Pa = 5{,}5176\cdot 10^5\ Pa =$
$= 5{,}5176\ bar$

Această valoare se află în intervalul de măsurare $0-10\ bar$, deci se poate folosi manometrul disponibil pentru măsurarea presiunii de $80\ psi$.

Știind că : $1\ bar = 10^5\ Pa$

$$1\ atm = 1{,}013\cdot 10^5\ Pa = 1{,}013\ bar = 760\ torr$$

Dacă pentru accelerația gravitațională luăm valoarea exactă $g = 9{,}807 m/s^2$, avem:

$$1\ at = 0{,}9807\cdot 10^5\ Pa = 0{,}9807\ bar = 10\ m\ col\ H_2O = \frac{1\ kgf}{cm^2}$$

Obținem :

$$p_m = 5{,}5176\ bar = \frac{5{,}5176}{1{,}013}\ atm = 5{,}4468\ atm$$

$$p_m = 5{,}4468\ atm = 5{,}4468\cdot 760\ torr = 4139{,}6\ torr$$

$$p_m = 5{,}5176\ bar = \frac{5{,}5176}{0{,}9807}\ at = 5{,}6261\ at = 5{,}6261\ \frac{kgf}{cm^2}$$

$$p_m = 5{,}6261\ at = 5{,}6261\cdot 10\ m\ col\ H_2O = 56{,}261\ m\ col\ H_2O$$

1.2.4. Măsurând presiunea de refulare la un compresor cu ajutorul unui manometru s-a găsit valoarea $p_m = 12\ bar$, presiunea atmosferică fiind $p_{atm} = 740\ torr$. Să se determine presiunea absolută, p.

Rezolvare :

Este cunoscută relația (vezi fig. 1.1.) :

$p = p_{atm} + p_m$

în care :

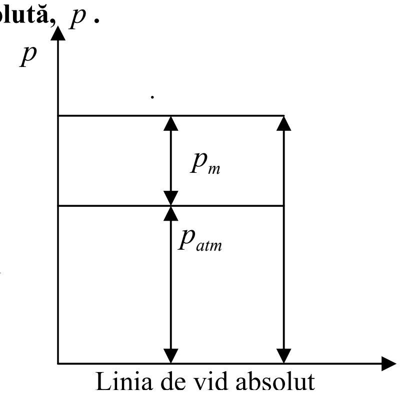


Fig. 1.1

$p_{atm} = 740 \ torr = \dfrac{740}{760} \cdot 1{,}013 \ bar = 0{,}9863 \ bar$

Atunci :

$p = 12 + 0{,}9863 = 12{,}9863 \ bar$

1.2.5. Măsurând presiunea în galeria de admisie a unui motor cu ardere internă cu ajutorul unui vacuumetru s-a găsit valoarea $p_v = 0{,}4 \ bar$, presiunea atmosferică fiind $p_{atm} = 720 \ torr$. Să se determine presiunea absolută, p şi să se exprime în $m \ col \ H_2O$.

Rezolvare :

Pentru presiuni sub cea atmosferică relația care dă presiunea absolută (vezi fig. 1.2.) este :

$p = p_{atm} - p_v$

în care :

$p_{atm} = \dfrac{720}{760} \cdot 1{,}013 \ bar = 0{,}9597 \ bar$

Atunci :

$p = 0{,}9597 - 0{,}4 \ bar = 0{,}5597 \ bar$

Exprimăm această valoarea în $m \ col \ H_2O$ ținând seama că din definiția stării tehnice normale avem :

$0{,}9807 \ bar = 10 \ m \ col \ H_2O$

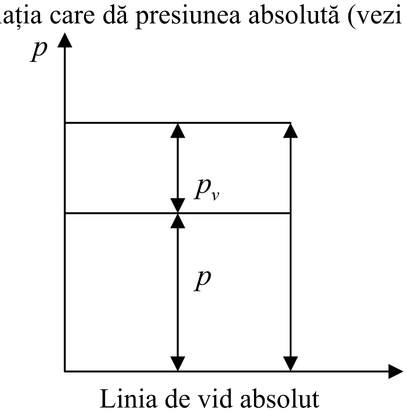


Fig. 1.2.

Deci : $p = 0{,}5597 \cdot \dfrac{10}{0{,}9807} = 5{,}707 \ m \ col \ H_2O$

1.2.6. În habitaclul unui autoturism se înregistrează o temperatură de confort $t_c = 23^\circ C$. Să se exprime această valoare în K, $^\bullet \mathrm{Re}$, $^\circ F$, $^\circ R$.

Rezolvare :

Având în vedere relațiile de transformare a temperaturilor (tab. 1.4.16.), putem scrie :

$$T = t_c + 273{,}15 = 23 + 273{,}15 = 296{,}15 \ K$$

$$t_{\text{Re}} = \frac{4}{5} \cdot t_c = \frac{4}{5} \cdot 23 = 18{,}4^\circ \ \text{Re}$$

$$t_F = \frac{9}{5} \cdot t_c + 32 = \frac{9}{5} \cdot 23 + 32 = 73{,}4^\circ F$$

$$t_R = \frac{9}{5} \cdot t_c + 491{,}67 = \frac{9}{5} \cdot 23 + 491{,}67 = 533{,}07^\circ R$$

1.2.7. În circuitul de răcire al unui motor se înregistrează o temperatură de regim $t_F = 179{,}6^\circ F$. Să se exprime această valoare în $^\circ C$, K, $^\bullet\text{Re}$, $^\circ R$.

Rezolvare :

Având în vedere relațiile de transformare a temperaturilor exprimate în diferite scări (tab. 1.4.16.), putem scrie :

$$t_C = \frac{5}{9} \cdot (t_F - 32) = \frac{5}{9} \cdot (179{,}6 - 32) = 82^\circ C$$

$$T = \frac{5}{9} \cdot (t_F - 32) + 273{,}15 = \frac{5}{9} \cdot (179{,}6 - 32) + 273{,}15 = 355{,}15 \ K$$

$$t_{\text{Re}} = \frac{4}{9} \cdot (t_F - 32) = \frac{4}{9} \cdot (179{,}6 - 32) = 65{,}6^\circ C$$

$$t_R = t_F + 459{,}67 = 179{,}6 + 459{,}67 = 639{,}27^\circ R$$

1.2.8. În vaporizatorul unei instalații frigorifice se înregistrează o temperatură $T = 253{,}15 \ K$. Să se exprime această valoare în $^\circ C$, $^\circ F$, $^\bullet\text{Re}$, $^\circ R$.

Rezolvare :

Având în vedere relațiile de transformare a temperaturilor exprimate în diferite scări (tab. 1.4.16.), putem scrie :

$$t_C = T - 273{,}15 = 253{,}15 - 273{,}15 = -20^\circ C$$

$$t_F = \frac{9}{5} \cdot (T - 273{,}15) + 32 = \frac{9}{5} \cdot (253{,}15 - 273{,}15) + 32 = -\frac{9}{5} \cdot 20 + 32 = -4^\circ F$$

$$t_{\text{Re}} = \frac{4}{5} \cdot (T - 273{,}15) = \frac{4}{5} \cdot (253{,}15 - 273{,}15) = -\frac{4}{5} \cdot 20 = -16^\circ \ \text{Re}$$

$$t_R = \frac{9}{5} \cdot T = \frac{9}{5} \cdot 253{,}15 = 455{,}67^\circ R$$

1.2.9. Într-un stand al unui târg de automobile sunt prezentate două modele: un model la care consumul mediu de combustibil este precizat ca fiind de $30 \ mile/USgal$ şi al doilea model la care consumul mediu este de $6{,}5 \ l/100km$. Precizaţi care dintre cele două modele este mai economic.

Rezolvare :

Se ştie că : $1 \ mila(terestra) = 1{,}609 \ km$

$1 \ USgal = 3{,}785 \ l$

Deci, putem scrie : $\dfrac{30 \ mile}{USgal} = \dfrac{30 \cdot 1{,}609}{3{,}785} \cdot \dfrac{km}{l} = 12{,}75 \ \dfrac{km}{l}$

Prin urmare, consumul mediu de combustibil, $\overline{C}$, pentru primul model, exprimat în $\dfrac{l}{100km}$ este :

$$\overline{C} = \frac{100}{12{,}75} = 7{,}84 \ \frac{l}{100km} > 6{,}5 \ \frac{l}{100km}$$

Deci al doilea model este mai economic .

1.2.10. Determinând puterea efectivă a unui motor cu ardere internă pe standul de probă s-a găsit valoarea $P_e = 75 \ CP$. Exprimaţi această valoare în : kW, hp, $\dfrac{kgf \cdot m}{s}$, $\dfrac{kcal}{h}$.

Rezolvare :

Se ştie că :

$$1 \ CP = 735{,}5 \ W$$

Atunci :

$$P_e = 75 \ CP = 75 \cdot 735{,}5 \cdot 10^{-3} \ kW = 55{,}162 \ kW$$

De asemenea, se ştie că :

$$1 \ hp(horse \ power) = 745{,}7 \ W$$

Deci : $P_e = 55{,}162 \ \ kW = \dfrac{55{,}162 \cdot 10^3}{745{,}7} \ \ hp = 73{,}973 \ \ hp$

Efectuând calculele în ST rezultă :

$$1 \cdot \frac{kgf \cdot m}{s} = 9{,}81 \cdot \frac{N \cdot m}{s} = 9{,}81 \cdot \frac{J}{s} = 9{,}81 \ W = 9{,}81 \cdot 10^{-3} \ kW$$

Atunci :

$$P_e = 55{,}162 \ kW = \frac{55{,}162 \cdot 10^3}{9{,}81} \cdot \frac{kgf \cdot m}{s} = 5623{,}04 \cdot \frac{kgf \cdot m}{s}$$

De asemenea se ştie că :

$$\frac{1 \ kcal}{h} = \frac{10^3 \cdot cal}{3600 \ s} = \frac{4{,}187 \cdot 10^3}{3600} \cdot \frac{J}{s} = 1{,}163 \ W = 1{,}163 \cdot 10^{-3} \ kW$$

Atunci: $P_e = 55{,}162 \ \ kW = \dfrac{55{,}162}{1{,}163 \cdot 10^{-3}} \cdot \dfrac{kcal}{h} = 47430{,}8 \ \ \dfrac{kcal}{h}$

1.2.11. Pe un stand de probă se măsoară consumul orar de combustibil al unui motor cu ardere internă, $C_h = 17{,}2 \ \dfrac{kg}{h}$. Puterea efectivă a motorului determinată este $P_e = 75 \ \ CP$.

a) Să se determine consumul specific efectiv, c_e, al motorului şi să se exprime în $\dfrac{g}{kWh}$ şi $\dfrac{g}{CPh}$;

b) Să se compare din punct de vedere al economicității acest motor cu un altul la care $C_h = 22{,}9 \ \dfrac{kg}{h}$ şi $P_e = 99{,}3 \ kW$.

Rezolvare :

a) Consumul specific efectiv, c_e, se defineşte astfel :

$$c_e = \frac{C_h}{P_e}$$

Exprimând P_e în kW, rezultă :

$$P_e = 75 \ \ CP = 75 \cdot 735{,}5 \cdot 10^{-3} \ \ kW = 55{,}16 \ \ kW$$

Atunci : $c_e = \dfrac{17{,}2 \cdot 10^3 \; \frac{g}{h}}{55{,}16 \;\; kW} = 311{,}8 \;\; \dfrac{g}{kW \cdot h}$

Exprimând c_e în $\dfrac{g}{CP \cdot h}$ găsim :

$$c_e = \frac{17{,}2 \cdot 10^3 \;\; \frac{g}{h}}{75 \;\; CP} = 229{,}3 \;\; \frac{g}{CP \cdot h}$$

b) Procedând analog pentru al doilea motor se obține :

$$c_e = \frac{22{,}9 \;\; \frac{kg}{h}}{99{,}3 \;\; kW} = 230 \;\; \frac{g}{kW \cdot h} = 168{,}6 \;\; \frac{g}{CP \cdot h}$$

Deci, al doilea motor este mai economic decât primul.

1.2.12. Un motor cu aprindere prin scânteie, într-un anumit regim de funcționare are un consum specific $c = 200 \;\; g/CP \cdot h$**. Determinați randamentul ciclului motor în acest regim, știind că puterea calorică inferioară a benzinei este** $H_i^b = 42035 \;\; kJ/kg$**.**

Rezolvare :

Consumul specific al ciclului se exprimă astfel :

$$c = \frac{m_b}{L} \qquad (1)$$

unde : m_b este masa de benzină, iar L este lucru mecanic al ciclului.

Cantitatea de căldură degajată prin arderea masei m_b de benzină este :

$$Q = m_b \cdot H_i^b \qquad (2)$$

Pe de altă parte, randamentul ciclului se scrie :

$$\eta = \frac{L}{Q} \qquad (3)$$

Ținând seama de (1) și (2), putem scrie :

$$\eta = \frac{\frac{m_b}{c}}{m_b \cdot H_i^b} = \frac{1}{c \cdot H_i^b} \qquad (4)$$

Prin înlocuire găsim : $\eta = \dfrac{1}{\dfrac{200\cdot 10^{-3}}{735,5\cdot 3600}\cdot 42035\cdot 10^{3}} = 0,315$

1.2.13. Ce volum ocupă 73 kg aer în condițiile stării fizice normale ? Se ştie că masa molară a aerului este $M_{aer} = 28,964\ kg/kmol$. Determinați densitatea aerului ρ_{aer}, şi volumul specific v_{aer} în această stare.

Rezolvare :

Se ştie că la starea fizică un $kmol$ din orice gaz ocupă acelaşi volum şi anume volumul molar normal, $V_{MN} = 22,414\ m_N^3$.

Deoarece 1 $kmol$ aer are o masă de $28,964\ kg$ şi ocupă volumul V_{MN}, rezultă că masa m va ocupa volumul :

$$V_N = \frac{m\cdot V_{MN}}{M} = \frac{73\cdot 22,414}{28,964} = 56,491\ m_N^3$$

Densitatea aerului în condițiile de mai sus este :

$$\rho_{aer} = \frac{m}{V_N} = \frac{73}{56,491}\cdot\frac{m_N^3}{kg} = 1,2922\ \frac{kg}{m_N^3}$$

volumul specific la starea fizică normală a aerului este:

$$v_{aer} = \frac{1}{\rho_{aer}} = 0,7739\ m_N^3/kg$$

1.2.14. Într-un recipient cu volumul de $60\ m^3$ se află amoniac în condiții de presiune şi temperatură normale (la starea fizică normală). Să se determine masa amoniacului ştiind că $M_{NH_3} = 17,031\ kg/kmol$. Câți kmol de substanță se găsesc în recipient ?

Rezolvare :

$17,031\ kg$ amoniac ocupă $22,414\ m_N^3$

m ……………………….. $60\ m_N^3$

$$m = \frac{60\cdot 17,031}{22,414} = 45,59\ kg$$

Cantitatea υ, exprimată în kmoli de substanță aflată în recipient se determină astfel:

$$1\ kmol \text{ amoniac are } 17{,}031\ kg$$

$$\upsilon \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ 45{,}59\ kg$$

$$\upsilon = \frac{45{,}59}{17{,}031} = 2{,}67\ kmol\ .$$

1.3. Probleme propuse spre rezolvare

1.3.1. Un motor cu ardere internă dezvoltă o putere efectivă $P_e = 80\ CP$. Să se exprime puterea motorului în unități SI.

R : $P_e = 58{,}86\ kW$

1.3.2. Puterea calorică inferioară a unui combustibil este $H_i = 3500\ kcal/kg$. Să se exprime H_i în unități SI.

R : $H_i = 14{,}65\ MJ/kg$

1.3.3. Un motor cu ardere internă are puterea efectivă $P_e = 50\ CP$ şi dezvoltă la arborele motor un moment de torsiune $M_t = 25\ kgf \cdot m$. Unul din pistoanele motorului are greutatea $G_p = 0{,}8\ kgf$ şi viteza medie $w = 5\ m/s$.

Se cer :

a) Să se exprime puterea efectivă şi momentul de torsiune efectiv în unități SI;
b) Să se determine energia cinetică a unui piston efectuând calculele în SI şi ST.

R : $P_e = 36{,}79\ kW$; $M_e = 245{,}25\ N \cdot m$

$E_c = 10\ J = 1{,}019\ kgf \cdot m$

1.3.4. Măsurând presiunea într-o incintă cu ajutorul unui manometru s-a găsit valoarea $p_m = 2\ bar$, presiunea atmosferică fiind $p_{atm} = 730\ torr$. Să se determine presiunea absolută şi să se exprime în : Pa, bar, atm, $torr$, at, kgf/cm^2, $m\ col\ H_2O$.

R : $p = 297309\ Pa$; $p = 3{,}0316\ at$;
$p = 2{,}97309\ bar$; $p = 3{,}0316\ kgf/cm^2$;
$p = 2{,}935\ atm$; $p = 30{,}316\ m\ col\ H_2O$;
$p = 2230{,}375\ torr$

1.3.5. Măsurând temperatura gazelor de evacuare la ieşire din toba de eşapament a unui automobil s-a găsit valoarea $t_C = 150^\circ C$. Să se exprime această mărime în K , $^\circ F$, $^\bullet \mathrm{Re}$, $^\circ R$.

R : $T = 423{,}15\ K$; $t_{\mathrm{Re}} = 120^\circ \mathrm{Re}$;
$t_F = 302^\circ F$; $t_R = 761{,}67^\circ R$.

1.3.6. Despre un model de autoturism se ştie că se parcurg 18 km cu 1 l de combustibil. Să se determine : consumul în $l/100km$ şi în $US\ gal/mila$. Câte mile se parcurg cu 1 $US\ gal$.

R : $\overline{C} = 5{,}56\ l/100km$;
$\overline{C} = 0{,}0236\ US\ gal/mila$;
$d = 42{,}375\ mile$.

1.3.7. Un motor Diesel funcţionează după un ciclu al cărui randament este $\eta = 0{,}35$ iar consumul specific de combustibil este de 180 $g/CP \cdot h$. Să se determine puterea calorică inferioară a combustibilului utilizat.

R : $H_i = 42029\ kJ/kg$

1.4. Test grilă

- *Timp de lucru: 20 min.*
- *Fiecare întrebare se punctează cu 1 punct.*

1. Care dintre următoarele variante sunt adevărate:

a) $1\ kgf = 9{,}807\ N$; b) $1\ N\cdot m = 1\ kgf$; c) $1\ N\cdot m = 1\ J$;

d) $1\ kgfm = 9{,}807\ kJ$; e) $1\ kgfm = 9{,}807\ J$; f) $1J = 0{,}102\ kgfm$;

2. Care dintre următoarele variante sunt adevărate:

a) $1\ Pa = 10^5\ bar$; b) $1bar = 10^5\ Pa$; c) $1\ bar = 1\ at$;

d) $1\ bar = 1{,}013\cdot 10^5\ Pa$; e) $1\ bar<1\ at<1atm$; f) $1at<1bar<1\ atm$;

3. Care dintre următoarele variante sunt adevărate:

a) $T\,[K] = t\,[^oC] + 273{,}15$; b) $T\,[K] = 273{,}15 - t\,[^oC]$; c) $0\ K = 273{,}15\ ^oC$

d) $1^oC = 1{,}8\ ^oF$; e) $1^o C < \frac{9}{5}\,^o F$; f) $O^oC = +32^oF$;

4) Care dintre următoarele variante sunt adevărate:

a) $1\ kW = 1{,}36\ CP$; b) $1\ kW = 75\ CP$; c) $1CP = 75\frac{kgf\cdot m}{s}$;

d) $1CP = 735{,}5\ W$; e) $1\frac{kcal}{h} = 1{,}163W$; f) $1\frac{kcal}{h} > 1CP$;

5) Care dintre următoarele variante sunt adevărate:

a) $1J = 0{,}239\ kcal$; b) $1J = 0{,}239\ cal$; c) $1cal = 4{,}187\ J$;

d) $1\ MJ = 0{,}2777\ kWh$; e) $1Btu = 1\ kJ$; f) $1Btu = 1{,}055\ kJ$;

6) Care dintre următoarele variante sunt adevărate:

a) $1dm^3 = 0{,}1\ l$; b) $1dm^3 = 1\ l$;

c) $1m^3 = 16{,}39\cdot 10^{-3}\ l$; d) $1\ m^3 = 16{,}39\cdot 10^{-3}\ m^3$;

e) $1\ m^3 = 10^5\ l$; f) $1\ m^3 = 10^3\ l$;

7) Care dintre următoarele variante sunt adevărate:

a) $1\ atm = 1{,}013\ bar$; b) $1\ atm = 0{,}9807\ Pa$;

c) $1\ at = 0{,}9807\cdot 10^5\ Pa$; d) $1\ atm = 760\ torr$;

e) $1psi = 6{,}985\ kPa$; f) $1at = 10\ m\ col\ H_2O$;

8) La starea fizică normală, care dintre următoarele relații sunt adevărate:

a) $1\ kmol\ CO_2 = 44\ kg$;

b) $1\ kmol\ CO_2 = 44\ m_N^3$

c) $64\ kg\ O_2 = 2\ m_N^3$;

d) $64\ kg\ CO_2 = 44,828\ m_N^3$;

e) $1\ kmol\ CO_2 = 64\ kg$;

f) $1\ kmol\ O_2 = 32\ kg$;

9. Care din următoarele variante sunt adevărate:

a) $1\ J/kgK = 1\ J/kg^oC$;

b) $1\ kJ/kg^oC = 239\ cal/^oC$;

c) $1\ kcal/kg^oC = 4187\ J/kgK$

d) $1\ kcal/kg^oC = 10^3\ J/kg^oC$;

e) $1\ J/kgK = 1\ cal/kg^oC$;

f) $1\ cal = 4,187\ J$;

10) Care din următoarele variante sunt adevărate:

a) $1\ K = 1^oC = \frac{4}{5}\,^oRe = \frac{9}{5}\,^oF = \frac{9}{5}\,^oR$;

b) $1\ K = 1^oC = \frac{5}{4}\,^oRe = \frac{5}{9}\,^oF = \frac{9}{5}\,^oR$;

c) punctul de îngheț al apei este: $0\ ^oC$; $0\ ^oR$; $+32\ ^oF$

d) punctul de fierbere al apei este: $373,15\ K$; $212\ ^oF$

e) punctul de îngheț al apei este $0\ ^o$ pe orice scară

f) punctul de fierbere al apei este $100\ ^o$ pe orice scară.

CAPITOLUL 2

MĂRIMI MOLARE. LEGILE GAZELOR PERFECTE

2.1. Relaţii de calcul

a) Legea Boyle-Mariotte

$$pV = ct.\text{, la } T = ct. \tag{2.1.}$$

b) Legea Gay-Lussac

$$\frac{V}{T} = ct.\text{, la } p = ct. \tag{2.2.}$$

c) Legea Charles

$$\frac{p}{T} = ct.\text{, la } V = ct. \tag{2.3.}$$

d) Forme ale ecuaţiei termice de stare

$$\frac{pV}{T} = ct. \tag{2.4.}$$

$$p \cdot v = RT \tag{2.5.}$$

$$p \cdot V = mRT \tag{2.6.}$$

$$p \cdot V = \upsilon R_M \cdot T \tag{2.7.}$$

$$p \cdot \dot{V} = \dot{m}RT \tag{2.8.}$$

e) Relaţii de legătură între $kmol$, kg şi m_N^3 la starea fizică normală :

$$1\ kmol = M \cdot kg = V_{M,N} \cdot m_N^3 \tag{2.9.}$$

în care : M - este masa molară a gazului

$V_{M,N} = 22{,}414\ m_N^3/kmol$ volumul molar normal.

f) densitatea gazului în starea fizică normală :

$$\rho_N = \frac{M}{22{,}414},\ kg/m_N^3 \tag{2.10.}$$

g) Relaţia dintre masa molară şi constanta generală a unui gaz

$$R = \frac{R_M}{M} = \frac{8314{,}3}{M},\ J/kg \cdot K \tag{2.11.}$$

$$R_M = 8314{,}3\ J/\ kmol \cdot K$$

h) Determinarea numărului de kmoli, υ :

$$\upsilon = \frac{m}{M} \qquad (2.12.)$$

i) Relația de legătură dintre volumul ocupat de un gaz în m_N^3 şi numărul de *kmol*

$$V_N = 22{,}414 \cdot \upsilon \qquad (2.13.)$$

j) Numărul lui Avogardo

$$N_A = 6{,}023 \cdot 10^{26} \ \ molec/kmol \qquad (2.14.)$$

2.2. Probleme rezolvate

2.2.1. Să se determine constanta specifică R, volumul specific v_N şi densitatea ρ_N la starea fizică normală pentru bioxidul de carbon (CO_2). Care va fi densitatea gazului la starea tehnică normală ?

Rezolvare :

- constanta specifică a CO_2 :

$$R_{CO_2} = \frac{R_M \ [J/kmol \cdot K]}{M_{CO_2} \ [kg/kmol]} = \frac{8314{,}3}{1 \cdot 12 + 2 \cdot 16} = 188{,}95 \ \ \frac{J}{kg \cdot K}$$

- volumul specific la starea fizică normală :

$$v_N = \frac{V_{M,N}}{M_{CO_2}} = \frac{22{,}414}{44} = 0{,}509 \ \ m_N^3/kg$$

- densitatea la starea fizică normală :

$$\rho_N = \frac{1}{v_n} = \frac{M_{CO_2}}{V_{M,N}} = \frac{44}{22{,}414} = 1.963 \ \ kg/m_N^3$$

Ecuația de stare a gazelor în cele două stări se scrie astfel :

$$p_N \cdot v_N = RT_N \ ; \ \frac{p_N}{\rho_N} = RT_N \ ; \ \rho_N = \frac{p_N}{RT_N} \qquad (1)$$

$$p_n \cdot v_n = RT_n \ ; \ \frac{p_n}{\rho_n} = RT_n \ ; \ \rho_n = \frac{p_n}{RT_n} \qquad (2)$$

Prin împărțirea relațiilor (2) şi (1) obținem :

$$\rho_n = \rho_N \cdot \frac{p_n}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T_n}$$

adică : $\rho_n = 1{,}963 \cdot \dfrac{0{,}9807 \cdot 10^5}{1{,}013 \cdot 10^5} \cdot \dfrac{273{,}15}{273{,}15 + 20} = 1{,}771 \ kg/m^3$

2.2.2. Într-un rezervor închis cu volumul $V = 50 \ dm^3$ se găseşte hidrogen (H_2) la presiunea $p_1 = 100 \ bar$ şi temperatura $t_1 = 20^\circ C$. În mod accidental rezervorul se încălzeşte până când temperatura gazului ajunge la $t_2 = 80^\circ C$. Să se determine :

a) constanta gazului ;
b) cantitatea de gaz din rezervor exprimată în kg, $kmol$ şi m_N^3 ;
c) presiunea gazului din rezervor după încălzire ;
d) numărul de molecule de H_2 dintr-un cm^3.

Rezolvare :

a) Constanta gazului este : $R_{H_2} = \dfrac{R_M}{M_{H_2}} = \dfrac{8314{,}3}{1 \cdot 2} = 4157{,}15 \ J/kg \cdot K$

b) Masa gazului : $m = \dfrac{p_1 \cdot V}{R_{H_2} \cdot T_1} = \dfrac{100 \cdot 10^5 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{4157{,}15 \cdot 293{,}15} = 0{,}410 \ kg$

în care $T_1 = t_1 + 273{,}15 = 20 + 273{,}15 = 293{,}15 \ K$.

Cantitatea de gaz exprimată în kmoli este :

$$\upsilon = \frac{m}{M_{H_2}} = \frac{0{,}410}{2} = 0{,}205 \ kmol$$

Cantitatea de gaz exprimată în m_N^3 este :

$$V_N = V_{M,N} \cdot \upsilon = 22{,}414 \cdot 0{,}205 = 4{,}595 \ m_N^3$$

c) Presiunea gazului din rezervor după încălzire este :

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 100 \cdot \frac{80 + 273{,}15}{293{,}15} = 120{,}47 \ bar$$

d) Numărul de molecule de H_2 din întreg rezervorul este $N = \nu \cdot N_A$, unde $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{26} \ molecule/kmol$ este numărul lui Avogardo.

Atunci, numărul de molecule dintr-un cm^3 va fi :

$$N_1 = \frac{N}{V} = \frac{\upsilon \cdot N_A}{V} = \frac{0{,}205 \cdot 6{,}023 \cdot 10^{26}}{50 \cdot 10^3} = 2{,}46 \cdot 10^{21} \ molec./cm^3 .$$

2.2.3. O butelie cu capacitatea de 60 l conține gaz metan (CH_4) la presiunea de $6\ bar$ şi temperatura de $20^\circ C$. Prin ardere se consumă din butelie gaz până când presiunea scade la $1{,}1\ bar$. Considerând că temperatura rămâne constantă în butelie să se determine :

a) masa gazului consumat din butelie ;

b) căldura degajată prin ardere dacă puterea calorică inferioară este $H_i = 35797 \ \ kJ/m_N^3$.

Rezolvare :

a) Scriind ecuația termică de stare înainte de ardere determinăm masa inițială de gaz :

$$p_1 V_1 = m_1 \cdot R T_1 ; \ \ m_1 = \frac{p_1 V_1}{R T_1}$$

în care : $R_{CH_4} = \dfrac{R_M}{M_{CH_4}} = \dfrac{8314{,}3}{12 + 4 \cdot 1} = 519{,}6 \ \ J/kg \cdot K$.

Deci : $m_1 = \dfrac{6 \cdot 10^5 \cdot 60 \cdot 10^{-3}}{519{,}6 \cdot 293{,}15} = 0{,}236 \ \ kg$.

Analog, determinăm masa de gaz m_2 rămasă în butelie după ardere :

$$m_2 = \frac{p_2 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{1{,}1 \cdot 10^5 \cdot 60 \cdot 10^{-3}}{519{,}6 \cdot 293{,}15} = 0{,}043 \ \ kg$$

Masa de gaz metan consumată din butelie :

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 0{,}236 - 0{,}043 = 0{,}193 \ \ kg$$

b) Căldura degajată prin arderea gazului metan consumat va fi :

$$Q = V_N \cdot H_i = \nu \cdot V_{M,N} \cdot H_i = \frac{\Delta m}{M_{CH_4}} \cdot V_{M,N} \cdot H_i$$

$$Q = \frac{0{,}193}{16} \cdot 22{,}414 \cdot 35797 = 9678{,}4 \ \ kJ$$

2.2.4. Un tub cilindric orizontal este împărțit în n compartimente cu ajutorul a $n-1$ pistoane de masă neglijabilă şi fără frecări care inițial sunt blocate, astfel încât volumele şi presiunile gazului din compartimente sunt p_k, V_k ($k = 1,2,\ldots,n$). Să se determine presiunea ce se stabileşte în compartimente dacă pistoanele se deblochează.

Rezolvare :

În fiecare compartiment, după deblocare, gazul suferă evoluție izotermă până la starea de echilibru când presiunea devine p . Deci putem scrie :

$$p_1 \cdot V_1 = p \cdot V_1'$$
$$p_2 \cdot V \ = p \cdot V_2'$$
....
$$p_n \cdot V_n = p \cdot V_n'$$
$$p_1 \cdot V_1 + p_2 \cdot V_2 + \ldots + p_n \cdot V_n = p \cdot \left(V_1' + V_2' + \ldots + V_n'\right)$$

Dar : $V_1' + V_2' + \ldots + V_n' = V_1 + V_2 + \ldots + V_n$, ceea ce conduce la :

$$p = \frac{p_1 \cdot V_1 + p_2 \cdot V_2 + \ldots + p_n \cdot V_n}{V_1 + V_2 + \ldots + V_n} = \frac{\sum_{k=1}^{n} p_k \cdot V_k}{\sum_{k=1}^{n} V_k}$$

2.2.5. Un rezervor ce conține un gaz este împărțit cu ajutorul unui perete mobil în două părți având raportul volumelor $V_1/V_2 = 2/3$. Temperatura gazului în volumul V_1 este $t_1 = 177^\circ C$, iar temperatura gazului în volumul V_2 este $t_2 = 267^\circ C$. Presiunea în ambele compartimente este aceeași și egală cu p. Care va fi raportul volumelor ocupate de cele două gaze când sunt aduse la aceeași temperatură ?

Rezolvare :

Aducerea gazului din cele două compartimente la aceeași temperatură T, presupune o evoluție izobară, astfel că cele două compartimente vor avea volumele V_1' respectiv V_2'.

Ca urmare se poate scrie :

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_1'}{T} \quad (1) \qquad\qquad \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_2'}{T} \quad (2)$$

Scoțând mărimea T din cele două relații avem :

$$T = \frac{V_1' \cdot T_1}{V_1} = \frac{V_2' \cdot T_2}{V_2} \quad (3)$$

Prelucrând relația (3), rezultă : $\frac{V_1'}{V_2'} = \frac{V_1 \cdot T_2}{V_2 \cdot T_1}$

adică :

$$\frac{V_1'}{V_2'} = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \frac{2}{3} \cdot \frac{273{,}15 + 267}{273{,}15 + 177} = 0{,}8$$

2.2.6. Într-un tub cilindric, orizontal, deschis la ambele capete se află două pistoane, ușoare, de secțiune $S = 10\ cm^2$, care se pot mişca fără frecare. Presiunea şi temperatura aerului dintre cele două pistoane este $p_0 = 1\ bar$, $t = 27^\circ C$. Până la ce temperatură t_1 poate fi încălzit aerul, delimitat de cele două pistoane astfel ca firul ce leagă pistoanele între ele să nu se rupă ? Tensiunea maximă suportată de fir este $F = 30\ N$.

Rezolvare :

Aerul aflat între cele două pistoane suferă o evoluție izocoră, pistoanele fiind imobilizate datorită firului de legătură. De aceea putem scrie :

$$\frac{p_a}{T} = \frac{p_0 + p}{T_1} \quad (1)$$

unde : $T = t + 273{,}15 = 27 + 273{,}15 = 300{,}15\ K$

T_1 este temperatura limită de încălzire

p - este creşterea de presiune prin încălzire

iar $p = \frac{F}{S}$ (2)

Relația (1) devine atunci :

$$T_1 = T \cdot \frac{p_0 + p}{p_0} = T \cdot \left(1 + \frac{p}{p_0}\right) = T \cdot \left(1 + \frac{F}{S \cdot p_0}\right)$$

Adică : $T_1 = 300{,}15 \cdot \left(1 + \frac{30}{10 \cdot 10^{-4} \cdot 10^5}\right) = 390{,}20\ K$

sau $t_1 = 390{,}20 - 273{,}15 = 117{,}05^\circ C$.

2.2.7. Debitul de aer al unui compresor la starea fizică normală este : $\dot{V}_N = 10\ m_N^3/\min$. Aspirația aerului în compresor se face la $p_1 = 1\ bar$ şi $t_1 = 20^\circ C$, iar refularea la $p_2 = 0{,}5\ MPa$ şi $t_2 = 80^\circ C$. Se cer :

a) Debitul volumic de aer aspirat, $\dot{V}_1$ **(**$m^3/\min$**) ;**

b) Debitul volumic de aer rezultat, $\dot{V}_2$ **(**$m^3/\min$**) ;**

c) Debitul masic de aer.

Rezolvare :

a) Între starea fizică normală şi starea termodinamică aferentă procesului de aspirație putem scrie ecuația :

$$\frac{p_1 \cdot \dot{V}_1}{T_1} = \frac{p_N \cdot \dot{V}_N}{T_N}$$

din care rezultă debitul volumic de aer aspirat :

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_N \cdot \frac{p_N}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_N} = 10 \cdot \frac{1{,}013 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^5} \cdot \frac{293{,}15}{273{,}15} = 10{,}872 \ m^3/\min$$

b) Procedând analaog pentru starea termodinamică aferentă refulării :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_N \cdot \frac{p_N}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_N} = 10 \cdot \frac{1{,}013 \cdot 10^5}{5 \cdot 10^5} \cdot \frac{273{,}15 + 80}{273{,}15} = 2{,}62 \ m^3/\min$$

c) Debitul masic de aer se determină observând că :

$$\dot{m} = \rho_N \cdot \dot{V}_N = \rho_1 \cdot \dot{V}_1 = \rho_2 \cdot \dot{V}_2$$

adică : $\dot{m} = \rho_N \cdot \dot{V}_N = \frac{M_{aer}}{V_{M,N}} \cdot \dot{V}_N = \frac{28{,}96}{22{,}414} \cdot 10 = 12{,}920 \ kg/\min$.

2.2.8. S-a constatat experimental că puterea efectivă a unui motor Diesel este proporțională cu debitul de aer aspirat.

Să se determine cu cât se modifică puterea motorului pentru două condiții de funcționare :

- regimul 1 : - presiunea atmosferică $p_1 = 760 \ torr$ **;**

- temperatura aerului $t_1 = -15^\circ C$ **.**

- regimul 2 : - presiunea atmosferică $p_2 = 700 \ torr$ **;**

- temperatura aerului $t_2 = 40^\circ C$ **.**

Rezolvare :

Vom scrie ecuația generală de stare pentru cele două regimuri :

- pentru regimul 1) : $p_1\dot{V} = \dot{m}_1 R T_1$ (1)
- pentru regimul 2) : $p_2\dot{V} = \dot{m}_2 R T_2$ (2)

Împărțind relațiile (2) şi (1) membru cu membru, găsim :

$$\frac{p_2}{p_1}=\frac{\dot m_2}{\dot m_1}\cdot\frac{T_2}{T_1}$$

adică :

$$\frac{\dot m_2}{\dot m_1}=\frac{p_2}{p_1}\cdot\frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{\dot m_2}{\dot m_1}=\frac{700}{760}\cdot\frac{273{,}15-15}{273{,}15+40}=0{,}759<1$$

Deci în al doilea regim se obține o scădere a puterii motorului. Procentual această scădere este :

$$\Delta p[\%]=\frac{\dot m_1-\dot m_2}{\dot m_1}\cdot 100\%=[1-\frac{\dot m_2}{\dot m_1}]\cdot 100\%=(1-0{,}759)\cdot 100\%=24{,}1\%$$

2.2.9. Un contor de gaze a înregistrat un consum lunar de gaz metan (CH_4) de $500\ m_N^3$. Temperatura incintei în care s-a efectuat măsurarea este de $25^\circ C$ şi presiunea atmosferică $p_{atm}=740\ torr$. Se cere să se determine consumul lunar real de gaz metan, $\dot V$, aferent stării de funcționare a utilizatorului şi să se exprime în m^3 şi în kg.

Rezolvare :

Pentru a calcula masa de gaz consumată, scriem ecuația de stare a gazelor pentru starea fizică normală :

$$p_N\dot V_N=\dot m R T_N$$

Deci :

$$\dot m=\frac{p_N\cdot\dot V_N}{RT_N}=\frac{101325\cdot 500}{\frac{8314{,}3}{16}\cdot 273{,}15}=356{,}927\ \ kg/luna$$

Ecuația de stare a gazelor pentru starea la care se efectuează măsurarea este următoarea :

$$p\cdot\dot V=\dot m R T$$

Cum masa este aceeaşi în cele două stări, putem determina mărimea $\dot V$, astfel :

$$\dot V=\frac{\dot m RT}{p}=\frac{356{,}927\cdot\frac{8314{,}3}{16}\cdot(273{,}15+25)}{740\cdot 133{,}3}=560{,}61\ \ m^3/luna\,.$$

2.2.10. Rezervorul de aer comprimat al unui compresor are o capacitate $V_R = 5\ m^3$ şi se găseşte în mediul ambiant cu presiunea $p_B = 756\ mm.Hg$ şi temperatura $t_1 = 15^\circ C$. Manometrul montat la rezervor indică inițial presiunea manometrică $p_{m_1} = 1{,}5\ at$. Compresorul are un debit $\dot{V}_N = 5\ m_N^3/\min$. Să se determine timpul τ cât trebuie să funcționeze compresorul pentru ca presiunea absolută finală a aerului din rezervor să devină $p_2 = 7\ bar$ la temperatura $t_2 = 20^\circ C$.

Se dau : $R_M = 8314{,}3\ J/kmol \cdot K$; $M_{aer} = 28{,}9\ kg/kmol$.

Rezolvare :

Presiunea absolută inițială în rezervor :

$$p_1 = p_B + p_{M_1} = \frac{756}{750} \cdot 10^5 + 1{,}5 \cdot 0{,}981 \cdot 10^5 = 2{,}47 \cdot 10^5\ Pa$$

Masa m a aerului din rezervor la începutul umplerii se determină din ecuația generală de stare :

$$p_1 \cdot V_R = m_1 \cdot R_{aer} \cdot T_1 \Rightarrow m_1 = \frac{p_1 \cdot V_R}{R_{aer} \cdot T_1}$$

unde : $$R_{aer} = \frac{R_M}{M_{aer}} = \frac{8314{,}3}{28{,}964} = 287\ J/kg \cdot K$$

Rezultă : $$m_1 = \frac{2{,}47 \cdot 10^5 \cdot 5}{287 \cdot 288} = 14{,}940\ kg$$

Masa aerului din rezervor la sfârşitul umplerii este :

$$m_2 = \frac{p_2 \cdot V_R}{R_{aer} \cdot T_2} = \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 5}{287 \cdot 293} = 41{,}621\ kg$$

Debitul masic al compresorului corespunzător debitului de $5\ m_N^3/\min$, este :

$$\dot{m}_c = \frac{p_N \cdot \dot{V}_N}{R_{aer} \cdot T_N} = \frac{1{,}01325 \cdot 10^5 \cdot 5}{287 \cdot 273} = 6{,}462\ kg/\min$$

Timpul de funcționare al compresorului va fi atunci :

$$\tau = \frac{m_2 - m_1}{\dot{m}} = \frac{41{,}621 - 14{,}940}{6{,}462} \min = 4{,}129\ \min = 247{,}7\ s.$$

2.3. Probleme propuse

2.3.1. Într-un recipient se găseşte cantitatea de $10\ m_N^3$ azot la presiunea de $7\ bar$ şi temperatura de $20^\circ C$. Se cer următoarele:

a) Volumul recipientului ;
b) Cantitatea de azot din recipient exprimată în $kmol$ şi kg ;
c) Densitatea azotului din recipient şi densitatea azotului la condiţii normale.

R : $V = 1{,}5532\ m^3$; $\nu = 0{,}446\ kmol$;
$m = 12{,}488\ kg$; $\rho = 8{,}04\ kg/m^3$;
$\rho_N = 1{,}2488\ kg/m_N^3$.

2.3.2. Într-o butelie de volum $40\ l$ se află azot la presiunea $p_1 = 10\ bar$ şi temperatura $t_1 = 27^\circ C$. Din greşeală butelia este amplasată lângă o sursă de căldură, temperatura azotului crescând la $t_2 = 173^\circ C$. Să se determine masa azotului din butelie şi presiunea lui la sfârşitul procesului de încălzire.

R : ; $p_2 = 14{,}86\ bar$
$m = 0{,}44\ kg$

2.3.3. Două rezervoare, în care se depozitează azot, comunică între ele printr-un tub de volum neglijabil şi prevăzut cu un robinet. În primul rezervor care are volumul $V_1 = 5\ m^3$ gazul are presiunea $p_1 = 7{,}2\ bar$, iar în al doilea rezervor care are volumul $V_2 = 3\ m^3$ gazul are presiunea $p_2 = 4{,}8\ bar$. Temperatura gazului, care rămâne tot timpul constantă este aceeaşi în ambele rezervoare şi are valoarea $t = 20^* C$. Se cere următoarele :

a) Cantitatea de azot din fiecare rezervor în stare iniţială ;
b) Presiunea existentă în rezervoare după deschiderea robinetului ;
c) Cantitatea de azot din fiecare rezervor după deschiderea robinetului.

R: a) $m_1 = 41{,}378\ kg$; $m_2 = 16{,}551\ kg$;
b) $p = 6{,}3 \cdot 10^5\ Pa$;
c) $m_1' = 36{,}206\ kg$; $m_2' = 21{,}723\ kg$

2.3.4. Într-un recipient se află $2\ kmol$ de oxigen la presiunea $8\ bar$ şi temperatura de $380\ K$. Din recipient se scoate o cantitate de oxigen până când presiunea scade la $5\ bar$ şi temperatura la $350\ K$.

Să se determine :

a) cantitatea de oxigen aflată în recipient, exprimată în kg şi m_N^3, în cele două stări şi volumul recipientului ;
b) concentrația moleculelor în starea finală.

R : a) $m_1 = 64\ kg$; $V_{1N} = 44{,}828\ m_N^3$;
$m_2 = 43{,}38\ kg$; $V_{2N} = 30{,}385\ m_N^3$
V = 7,89 m^3
b) $n = 1{,}035 \cdot 10^{26}\ molecule/m^3$

2.4. Teste grilă

- *Timp de lucru: 30 min.*
- *Fiecare întrebare se punctează cu 1 punct.*

1) Care dintre următoarele variante sunt adevărate:

a) $pV = RT$; b) $pv = RT$; c) $pV = \upsilon RT$;
d) $pV = mRT$; e) $pV = \upsilon R_M T$; f) $p \cdot \dot{V} = \dot{m}RT$;

2) Care dintre următoarele variante sunt adevărate:

a) $R = 8314{,}3\ \frac{J}{kg \cdot K}$; b) $R_M = 8314\ \frac{J}{kmol \cdot K}$; c) $R = \frac{R_M}{M}$;
d) $R_M = 8314\ \frac{J}{mol \cdot K}$; e) $R = 8314\ \frac{kJ}{kg \cdot K}$; f) $R = \frac{R_M}{22.414}\ \frac{J}{m_N^3 \cdot K}$;

3) Volumul specific al NO_2 la starea fizică normală este:

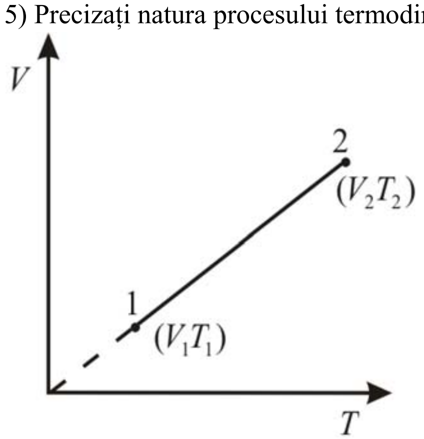
a) $v_{NO_2} = 0{,}487\ \frac{m_N^3}{kg}$; b) $v_{NO_2} = 4{,}87\ \frac{m_N^3}{kg}$; c) $v_{NO_2} = 1\ \frac{m_N^3}{kg}$;
d) $v_{MN} = 487\ \frac{l}{kg}$; e) $v_{NO_2} = 2{,}052\ \frac{m_N^3}{kg}$; f) $v_{MN} = 2{,}052\ \frac{kg}{m_N^3}$;

4) La starea fizică normală densitatea NO_2 este:

a) $\rho_{NO_2} = 0{,}487\ \frac{kg}{m_N^3}$; b) $\rho_{NO_2} = 2{,}052\ \frac{kg}{m_N^3}$; c) $\rho_{NO_2} = 1\ \frac{kg}{m_N^3}$;

d) $\rho_{NO_2} = 1\ \frac{m_N^3}{kg}$; e) $\rho_{NO_2} = 22{,}414\ \frac{kg}{m_N^3}$; f) $\rho_{NO_2} = 46\ \frac{kg}{m_N^3}$;

5) Precizați natura procesului termodinamic redat în figura alăturată:



a) proces izocor;

b) proces izobar;

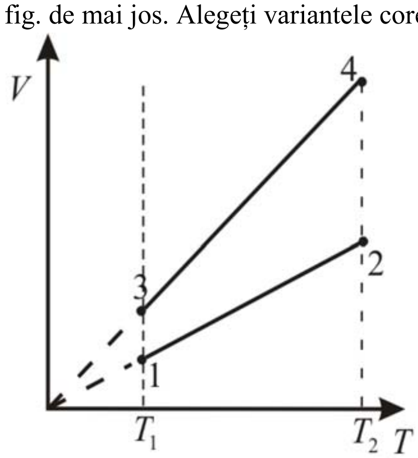
c) proces izoterm;

d) proces adiabat;

e) nici una din variantele a, b, c, d,;

f) oricare din variantele a, b, c, d.

6) Aceeaşi masă de gaz perfect suferă procesele 1–2, respectiv 3–4 redate grafic în fig. de mai jos. Alegeți variantele corecte.



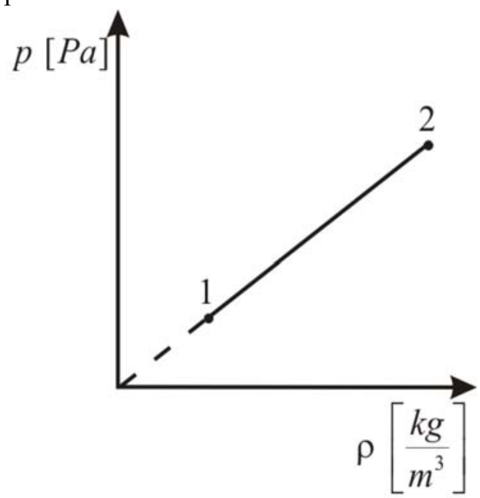
a)1–2 este un proces izobar (p_{12} = ct.)
3–4 este un proces izobar (p_{34} = ct.)
$p_{12} > p_{34}$

b)1–2 este un proces izobar (p_{12} = ct.)
3–4 este un proces izobar (p_{34} = ct.)
$p_{12} < p_{34}$

c)1 –2 este un proces adiabat
3–4 este un proces adiabat

d) nici una din variantele a, b, c.

7) O masă de gaz perfect suferă procesul redat în figura alăturată. Precizați natura procesului.



a) proces izocor;

b) proces izobar;

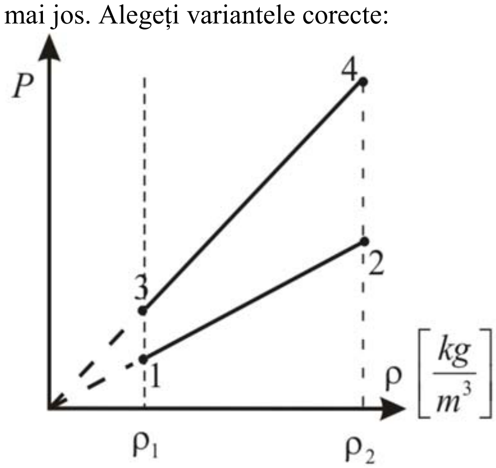
c) proces izoterm;

d) proces adiabat;

e) nici una din variantele a, b, c, d;

f) oricare din variantele a, b, c, d

8. Aceeaşi masă de gaz perfect suferă procesele 1–2 respectiv 3–4 redate în fig. de mai jos. Alegeți variantele corecte:



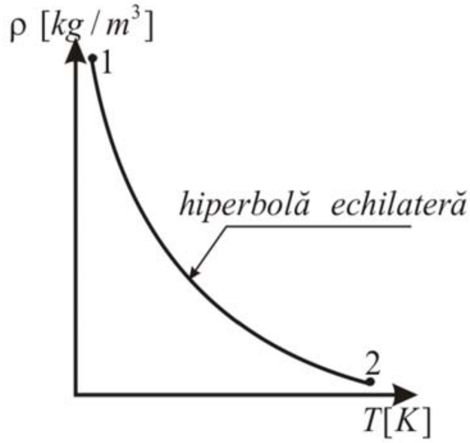
a) 1–2 este un proces izocor (V_{12} = ct)
3–4 este un proces izocor (V_{34} = ct)
$V_{12} > V_{34}$

b) 1–2 este un proces adiabat
3–4 este un proces adiabat

c) 1–2 este un proces izoterm (T_{12}=ct)
3–4 este un proces izoterm (T_{34}=ct)
$T_{12} < T_{34}$

d) 1–2 este un proces izoterm (T_{12}=ct)
3–4 este un proces izoterm (T_{34}=ct)
$T_{12} > T_{34}$

9) Aceeaşi masă de gaz perfect suferă procesul redat în figura alăturată. Precizați natura procesului.



a) proces izocor;

b) proces izobar;

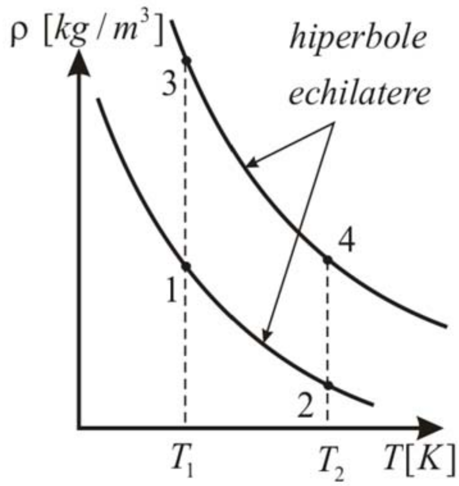
c) proces izoterm;

d) proces adiabat;

e) nici una din variantele a, b, c, d;

f) oricare din variantele a, b, c, d.

10) Aceeaşi masă de gaz perfect suferă procesele 1–2 respectiv 3–4 redate în fig. de mai jos. Alegeți variantele corecte:



a) 1–2 este un proces izobar ($p_{12} = ct$)
3–4 este un proces izobar ($p_{34} = ct$)
$p_{12} > p_{34}$

b) 1–2 este un proces izobar ($p_{12} = ct$)
3–4 este un proces izobar ($p_{34} = ct$)
$p_{12} < p_{34}$

c) 1–2 este un proces adiabat
3–4 este un proces adiabat

d) nici una din variantele a, b, c.

CAPITOLUL 3

CĂLDURI SPECIFICE ŞI CAPACITĂȚI CALORICE. CALORIMETRIE

3.1. Relații de calcul

a) Relația de legătură dintre :
   - căldura specifică masică c , $[J/kg \cdot K]$;
   - căldura specifică molară C_M , $[J/kmol \cdot K]$;
   - căldura specifică raportată la 1 m_N^3 , c_N , $[J/m_N^3 \cdot K]$

$$C_M = M \cdot c = V_{MN} \cdot c_N \tag{3.1.}$$

b) Relațiile lui Robert-Mayer :

$$C_{Mp} - C_{MV} = R_M = 8314{,}3 \ [J/kmol \cdot K] \tag{3.2.}$$

$$c_p - c_V = R = \frac{R_M}{M} \ [J/kg \cdot K] \tag{3.3.}$$

$$c_{Np} - c_{NV} = \frac{R_M}{V_{M,N}} = \frac{8314{,}3}{22{,}414} \ [J/m_N^3 \cdot K] \tag{3.4.}$$

în care indicii p şi v fac referire la căldurile specifice la presiune constantă, respectiv volum constant.

c) Definiția exponentului adiabatic şi relațiile de legătură între căldurile specifice :

$$k = \frac{c_p}{c_V} = \frac{C_{Mp}}{C_{MV}} = \frac{c_{Np}}{c_{NV}} \tag{3.5.}$$

$$c_p > c_V \tag{3.6.}$$

$$c_p - c_V = R \tag{3.7.}$$

$$c_V = \frac{R}{k-1} \tag{3.8.}$$

$$c_p = \frac{k}{k-1} \cdot R \tag{3.9.}$$

d) Capacitatea calorică :

$$C = m \cdot c \ [J/K] \tag{3.10.}$$

e) Determinarea căldurii specifice medii :

1.Metoda aproximației liniare

$$\overline{c}_p\Big|_{t_1}^{t_2} = a + b \cdot t_m \tag{3.11.}$$

în care coeficienții a şi b se iau din anexa 12, iar $t_m = \dfrac{t_1 + t_2}{2}$.

2.Metoda utilizării căldurilor specifice medii pe intervalul $(0, t)$

$$\overline{c}\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\overline{c}\Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - \overline{c}\Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \tag{3.12.}$$

În general, în calcule, căldurile specifice medii pe intervalul $0 - t$, la presiune constantă şi la volum constant se acceptă ca fiind cele redate în anexele 13 şi 14.

3.Metoda utilizării tabelelor

Tabelele cu călduri specifice ale gazelor perfecte conțin în mod obişnuit căldurile specifice la volum constant c_V la presiune constantă c_p, în funcție de temperatură (anexa 13 şi anexa 14).

Căldura specifică medie se va determina ca fiind căldura specifică citită din tabelele aferente temperaturii medii, adică $\overline{c}\Big|_0^{t_m}$.

f) Capacitatea calorică medie la presiune constantă $\overline{C}_p$ şi la volum constant $\overline{C}_V$ în intervalul de temperatură t_1, t_2.

$$\overline{C}_p\Big|_{t_1}^{t_2} = m \cdot \overline{c}_p\Big|_{t_1}^{t_2} \tag{3.13.}$$

$$\overline{C}_V\Big|_{t_1}^{t_2} = m \cdot \overline{c}_V\Big|_{t_1}^{t_2} \tag{3.14.}$$

g) Căldura schimbată de un corp cu exteriorul când temperatura acestuia variază între t_1 şi t_2 :

$$Q_{12} = m \cdot \overline{c}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) = \overline{C}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) \tag{3.15.}$$

3.2. Probleme rezolvate

3.2.1. Să se calculeze căldura necesară pentru a mări temperatura unui kilogram de dioxid de carbon de la temperatura inițială $t_1 = 100^\circ C$ la temperatura finală $t_2 = 700^\circ C$. Încălzirea se face : a) la presiune constantă ; b) la volum constant.

Să se calculeze căldurile specifice medii prin cele trei metode.

Rezolvare :

Metoda I – Metoda aproximației liniare.

În relația (3.11.), se înlocuiesc coeficienții a și b cu valorile corespunzătoare din anexa 12.

Astfel, se obține :

$$\overline{c}_p\Big|_{100}^{700} = 0{,}8248 + 3{,}236 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{100+700}{2} = 0{,}9542 \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

a) $q_{p_{1-2}} = \overline{c}_p\Big|_{100}^{700}(700-100) = 0{,}9542 \cdot 600 = 572{,}544 \ \dfrac{kJ}{kg}$

b) $q_{V_{1-2}} = \overline{c}_V\Big|_{100}^{700}(700-100)$

Aplicând relația (3.7.) rezultă căldura specifică medie la volum constant :

$$\overline{c}_V\Big|_{100}^{700} = \overline{c}_p\Big|_{100}^{700} - R = 0{,}9548 - \frac{8{,}3143}{44} = 0{,}7568 \ kJ/kg \cdot K$$

Deci, căldura necesară pentru mărirea temperaturii gazului de la $100^\circ C$ la $700^\circ C$ la volum constant va fi :

$$q_{V_{1-2}} = 0{,}7568 \cdot 600 = 459{,}503 \ kJ/kg$$

Metoda a II-a – Metoda utilizării căldurii specifice medii în intervalul $(0,t)$

a) În relația (3.12.) se introduc valorile căldurilor specifice medii la presiune constantă din anexa 13 și se obține :

$$\overline{c}_p\Big|_{100}^{700} = \frac{1{,}2230 \cdot 700 - 0{,}9136 \cdot 100}{700-100} = 1{,}275 \ kJ/kg \cdot K$$

Atunci : $q_{p_{12}} = \overline{c}_p\Big|_{100}^{700}(700-100) = 764{,}74 \ kJ/kg$

b) Din relația (3.7.) se obține valoarea căldurii specifice medii la volum constant între $100^\circ C$ și $700^\circ C$:

$$\overline{c}_V\Big|_{100}^{700} = \overline{c}_p\Big|_{100}^{700} - R = 1{,}275 - \frac{8{,}3143}{44} = 1{,}086 \;\; kJ/kg\cdot K$$

Observaţie : $\overline{c}_V\Big|_{100}^{700}$ se poate calcula de asemenea cu ajutorul relației (3.12.) şi anexa 14.

Deci : $q_{V_{1-2}} = \overline{c}_V\Big|_{100}^{700}(700-100) = 1{,}086\cdot 600 = 651{,}623 \;\; kJ/kg$

Metoda a III-a – Metode utilizării tabelelor

a) Din anexa 13 se ia valoarea căldurii specifice la presiune constantă pentru temperatura medie t_m unde :

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{100+700}{2} = 400^\circ C$$

Deci : $\overline{c}_p\Big|_{0}^{400} = 1{,}1103 \;\; kJ/kg\cdot^\circ C$

Rezultă : $q_{p_{1-2}} = \overline{c}_p\Big|_{0}^{400}(700-100) = 1{,}1103\cdot 600 = 666{,}18 \;\; kJ/kg$

b) Din relația (3.7.) se obține valoarea căldurii specifice la volum constant aferentă temperaturii medii

$$\overline{c}_V\Big|_{0}^{400} = \overline{c}_p\Big|_{0}^{400} - R = 1{,}1103 - \frac{8{,}3143}{44} = 0{,}9213 \;\; kJ/kg\cdot K$$

Observaţie : $\overline{c}_V\Big|_{0}^{400}$ se poate găsi de asemenea din anexa 14.

$$q_{V_{1-2}} = \overline{c}_V\Big|_{0}^{400}(700-100) = 0{,}9213\cdot 600 = 552{,}803 \;\; kJ/kg$$

3.2.2. O cantitate de azot se încălzeşte la presiune constantă de la temperatura $t_1 = 157^\circ C$ până la temperatura $t_2 = 443^\circ C$. Să se determine căldura specifică medie raportată la $1\ kg$ pe acest interval de temperatură..

Rezolvare :

1) Metoda bazată pe cunoaşterea expresiei analitice a căldurii specifice

Considerând o variație liniară a căldurii specifice cu temperatura (căldura specifică aparentă) şi extrăgând din anexa 12 constantele a şi b rezultă căldura specifică medie :

$$\overline{c}_{p,N_2}\Big|_{t_1}^{t_2} = a + b \cdot t_m = 1{,}0425 + 1{,}528 \cdot 10^{-4} \cdot t_m \ \ kJ/kg \cdot K$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{157 + 443}{2} = \frac{600}{2} = 300^\circ C$$

Rezultă : $\overline{c}_{p,N_2}\Big|_{t_1}^{t_2} = 1{,}0425 + 1{,}528 \cdot 10^{-4} \cdot 300 = 1{,}0883 \ \ kJ/kg \cdot K$

2) Metoda bazată pe existența de tabele cu călduri specifice reale (anexa 13)

Se determină : $t_m = \dfrac{t_1 + t_2}{2} = \dfrac{157 + 443}{2} = \dfrac{600}{2} = 300^\circ C$

Din anexa 13 se deduce :

$$\overline{c}_{p,N_2}\Big|_{t_1}^{t_2} = \overline{c}_{p,N_2}\Big|_{0}^{300} = 1{,}0693 \ \ kJ/kg \cdot K$$

3) Metoda bazată pe existența de tabele cu călduri specifice medii pe intervalele $0 \ldots t \ \left[{}^\circ C\right]$, anexa 13 şi anexa 14

Se cunosc : $t_1 = 157^\circ C$ şi $t_2 = 443^\circ C$.

Deoarece în tabel nu apar direct căldurile specifice pentru t_1 şi t_2, pentru a le determina se aplică metoda interpolării considerându-se o variație liniară a căldurilor specifice pe intervalul de $100^\circ C$.

Din tabel se citeşte : $\overline{c}_{p,N_2}\Big|_{0}^{100} = 1{,}0421 \ \ kJ/kg \cdot K$

$$\overline{c}_{p,N_2}\Big|_{0}^{200} = 1{,}0517 \ \ kJ/kg \cdot K$$

Se scad valorile temperaturilor şi respectiv valorile căldurilor specifice şi se obține :

$100^\circ C$ .... $0{,}0096 \ \ kJ/kg \cdot K$

$57^\circ C$ x

$$x = \frac{57 \cdot 0{,}0096}{100} = 0{,}005472 \ \ kJ/kg \cdot K$$

Rezultă pentru $t_1 = 157^\circ C$

$$\overline{c}_{p,N_2}\Big|_0^{157} = 1{,}0421 + 0{,}005472 = 1{,}047572 \;\; kJ/kg\cdot K$$

Tot din anexa 13 se citeşte :

$$\overline{c}_{p,N_2}\Big|_0^{400} = 1{,}0915 \;\; kJ/kg\cdot K$$

$$\overline{c}_{p,N_2}\Big|_0^{500} = 1{,}1154 \;\; kJ/kg\cdot K$$

se calculează :

$100^\circ C$ …………………………………… $0{,}0239 \;\; kJ/kg\cdot K$

$43^\circ C$ …………………………………….. x

$$x = \frac{43\cdot 0{,}0239}{100} = 0{,}01028 \;\; kJ/kg\cdot K$$

Rezultă că pentru $t_2 = 443^\circ C$:

$$\overline{c}_{p,N_2}\Big|_0^{443} = 1{,}0915 + 0{,}01028 = 1{,}10178 \;\; kJ/kg\cdot K$$

În final rezultă :

$$\overline{c}_{p,N_2}\Big|_{157}^{443} = \frac{\overline{c}_{p,N_2}\Big|_0^{443}\cdot 443 - \overline{c}_{p,N_2}\Big|_0^{157}\cdot 157}{443-157} =$$

$$= \frac{1{,}10178\cdot 443 - 1{,}047572\cdot 157}{443-157} = \frac{323{,}62}{286} = 1{,}1315 \;\; kJ/kg\cdot K$$

3.2.3. Să se reprezinte grafic variaţia exponentului adiabatic al hidrogenului în intervalul de temperaturi $200-1000\ K$, calculul căldurilor specifice efectuându-se, atât cu ajutorul relaţiilor, cât şi al tabelelor. Să se reprezinte grafic variaţia erorii procentuale care se face prin considerarea în calcule a valorii de $k=1{,}41$, în loc de valorile, variabile cu temperatura, obţinute din calcul.

Rezolvare :

Valorile exponentului adiabatic al hidrogenului pentru intervalul de temperatură considerat, obţinute cu ajutorul căldurilor specifice, determinate cu

relația (3.11.) sau din anexele 13 şi 14 sunt prezentate în tabelul 3.1. , împreună cu erorile rezultate din utilizarea, în locul acestor valori, a lui $k = 1{,}41$.

Tabel 3.1.

Calculul exponentului adiabatic pentru hidrogen, în intervalul de temperaturi $200 - 1000\ K$

$T[K]$	a. Determinarea cu ajutorul relațiilor de calcul			b. Calculul cu ajutorul valorilor tabelare			Eroarea $\varepsilon = \frac{1{,}41 - k}{1{,}41} \cdot 100[\%]$	
	c_p rel.3.11 $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	c_v rel.3.7 $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	k rel. 3.5.	C_{Mp} anexa 13 $\left[\frac{kJ}{kmol \cdot K}\right]$	C_{MV} rel. 3.2. $\left[\frac{kJ}{kmol \cdot K}\right]$	k rel. 3.5.	a.	b.
200	14,134	10,010	1,412	27,27	18,956	1,439	-0,1	-2,0
300	14,272	10,148	1,406	28,84	20,526	1,405	+0,3	+0,4
400	14,411	10,286	1,401	29,18	20,866	1,398	+0,6	+0,8
500	14,549	10,424	1,396	29,26	20,946	1,397	+1,0	+0,9
600	14,687	10,563	1,390	29,33	21,016	1,396	+1,4	+1,0
700	14,825	10,701	1,385	29,44	21,126	1,394	+1,8	+1,2
800	14,964	10,839	1,380	29,63	21,316	1,390	+2,2	+1,4
900	15,102	10,977	1,376	29,88	21,566	1,385	+2,5	+1,8
1000	15,240	11,116	1,371	30,21	21,896	384	+2,8	+1,9

În figura 3.2 s-au reprezentat variațiile exponentului adiabatic cu temperatura, curba (a) redând valorile obținute cu ajutorul relației 3.11. , iar (b), pe cele rezultate din utilizarea căldurilor specifice (anexa 13 şi anexa 14).

Erorile procentuale care se fac, dacă nu se ține seama de variațiile exponentului adiabatic cu temperatura, conduc la curbele reprezentate, pentru cele două metode de calcul adoptate (a) şi (b), în figura 3.1.

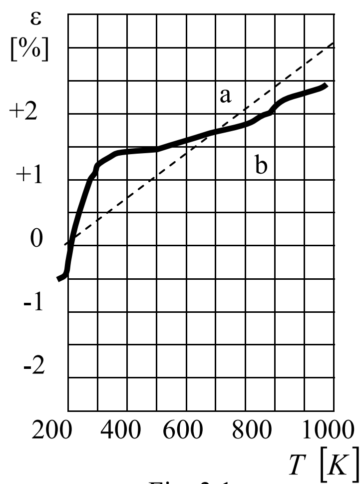


Fig. 3.1.

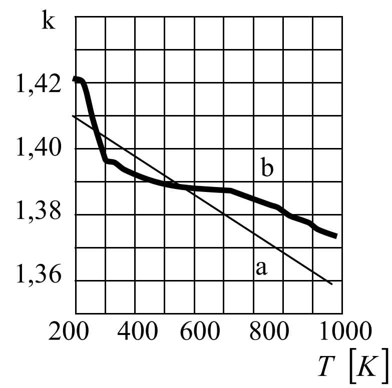


Fig. 3.2.

3.2.4. Într-un calorimetru izolat termic, al cărui vas din aluminiu cântăreşte $250\ kg$ şi în care se găseşte $1\ kg$ apă la temperatura de $12^\circ C$, se introduce o bucată de cupru de $150\ g$, aflat la temperatura de $200^\circ C$. Ce valoare se obține pentru căldura specifică a cuprului, dacă, după echilibrarea temperaturilor, termometrul cu care este prevăzut vasul calorimetric indică $14{,}65^\circ C$.

Rezolvare :

Punând condiția de echilibru termic al sistemului :

$$Q_{primit} = Q_{cedat}$$

în care :

$$Q_{primit} = m_{apa} \cdot c_{apa}\Big|_{12}^{14,65} (t_m - t) + m_{Al} \cdot c_{Al}\Big|_{12}^{14,65} (t_m - t)$$

$$Q_{cedat} = m_{Cu} \cdot c_{Cu}\Big|_{200}^{14,65} (t_{Cu} - t_m)$$

Rezultă : $$c_{Cu}\Big|_{200}^{14,65} = \frac{\left(m_{apa}\cdot c_{apa}\Big|_{12}^{14,65} - m_{Al}\cdot c_{Al}\Big|_{12}^{14,65}\right)\cdot\left(t_m - t\right)}{m_{Cu}\cdot\left(t_{Cu} - t_m\right)}$$

Se înlocuiesc valorile căldurilor specifice din anexele 1 şi 6.

Cum diferența dintre temperatura inițială şi temperatura de echilibru a apei şi aluminiului este foarte mică, căldurile specifice se consideră constante.

Prin interpolare, se găsesc valorile :

$$c_{apa}\Big|_{12}^{14,65} = 4,186\ \ kJ/kg\cdot K$$

$$c_{Al}\Big|_{12}^{14,65} = 0,8892\ \ kJ/kg\cdot K$$

Rezultă :

$$c_{Cu} = \frac{\left(1\cdot 4,186 - 0,25\cdot 0,8892\right)\cdot\left(14,65-12\right)}{0,15\cdot\left(200-14,65\right)} = 0,382\ \ kJ/kg\cdot K$$

3.2.5. Să se calculeze capacitatea calorică a unei mase de $20\ kg$ azot aflat la temperatura $500\ ^oC$, atât cu ajutorul tabelelor cât şi cu relațiile de calcul. Să se determine eroarea rezultată între cele două metode.

Rezolvare :

Din anexa 13 se găseşte valoarea căldurii specifice de presiune constantă.

$$\overline{c}_{p,N_2}\Big|_{0}^{773,15} = 1,1154\ \ kJ/kg\cdot K$$

$$\overline{C}_{p,500} = 20\cdot 1,1154 = 22,308\ \ kJ/K$$

Valoarea capacității calorice în care căldura specifică se determină cu relația (3.11.) şi coeficienții din anexa 12.

$$C_{p,500} = 20\cdot\left(1,0425 + 1,528\cdot 10^{-4}\cdot 500\right) = 23,2127\ \ kJ/K$$

Eroarea rezultată :

$$\Delta\varepsilon = \frac{23,2127 - 22,308}{23,2127}\cdot 100 = 3,89\%$$

3.4 Probleme propuse

3.3.1. Să se determine căldura specifică medie raportată la kilogram pentru oxidul de carbon care se încălzeşte la presiune constantă de la temperatura $t_1 = 205^\circ C$ până la temperatura $t_2 = 495^\circ C$ (problema va fi rezolvată utilizând toate cele trei metode de calcul a căldurii specifice medii).

R : a) $\left.\overline{c}_{p,CO}\right|_{205}^{495} = 1{,}108\ kJ/kg\cdot K$

b) $\left.\overline{c}_{p,CO}\right|_{205}^{495} = 1{,}093\ kJ/kg\cdot K$

c) $\left.\overline{c}_{p,CO}\right|_{205}^{495} = 1{,}094\ kJ/kg\cdot K$

3.3.2. Un recipient cu volumul $V = 800\ l$ conține oxigen la presiunea de $p_1 = 2\ bar$ şi temperatura $t_1 = 0^\circ C$; oxigenul suferă un proces de încălzire izocoră până la temperatura $t_2 = 200^\circ C$. Să se determine :

a) Cantitatea de căldură ce trebuie cedată oxigenului. Pentru determinarea căldurii specifice se va utiliza metoda a II-a : metoda utilizării căldurilor specifice medii pe intervalul $(0,t)$;
b) Valoarea presiunii finale a oxigenului.

R : $Q_V = 434{,}12\ kJ$

$p_2 = 3{,}464\ bar$

3.3.3. Să se calculeze căldura specifică masică şi molară la presiune constantă pentru CO, SO_2 şi O_2 la temperatura medie $t_m = 400^\circ C$ utilizându-se tabelele de călduri specifice.

R : a) pentru CO : $\left.\overline{c}_{p}\right|_{0}^{400} = 1{,}1057\ kJ/kg\cdot K$

$\left.\overline{C}_{Mp}\right|_{0}^{400} = 30{,}96\ kJ/kmol\cdot K$

b) pentru SO_2 : $\left.\overline{c}_{p}\right|_{0}^{400} = 0{,}753\ kJ/kg\cdot K$

$$\overline{C}_{Mp}\Big|_0^{400} = 48{,}192\ \ kJ/kmol\cdot K$$

c) pentru O_2: $\overline{c}_p\Big|_0^{400} = 1{,}0237\ \ kJ/kg\cdot K$

$$\overline{C}_{Mp}\Big|_0^{400} = 32{,}7584\ \ kJ/kmol\cdot K$$

3.4 Teste grilă

- *Timp de lucru: 10 min.*
- *Fiecare întrebare se punctează cu 1,5 puncte. Din oficiu 1 punct.*

1) Care dintre variantele de mai jos sunt adevărate:

a) $[c] = J/kg\cdot K$; b) $[c] = N\cdot m/kg\cdot K$;

c) $[C_M] = kJ/kmol\cdot K$; d) $[C_M] = kcal/kg\cdot K$;

e) $[c_N] = J/m_N^3\cdot K$; f) $[c_N] = kJ/m_N^3\cdot {}^oC$;

2) Care dintre următoarele relații sunt adevărate:

a) $c_p - c_v = R_M$; b) $\dfrac{c_p}{c_v} = R$; c) $\dfrac{c_p}{c_v} = k$;

d) $c_p - c_v = R$ e) $c_p = \dfrac{k}{k-1}\cdot\dfrac{R_M}{M}$; f) $\dfrac{c}{c_N} = \dfrac{V_{MN}}{M}$;

3) Dacă pentru CO_2, la temperatura de 100^oC avem $c_v = 724{,}7\ \ J/kg\cdot K$, atunci $c_{v_N}\ [kJ/m_N^3\cdot K]$ este:

a) $c_{v_N} = 1442{,}6\ \ J/m_N^3\cdot K$; b) $c_{v_N} = 1{,}4426\ \ J/m_N^3\cdot K$;

c) $c_{v_N} = 275{,}2\ \ J/m_N^3\cdot K$; d) $c_{v_N} = 844{,}4\ \ kJ/m_N^3\cdot K$;

e) $c_{v_N} = 1{,}443\ \ kJ/m_N^3\cdot K$; f) $c_{v_N} = 1000\ \ J/m_N^3\cdot K$;

4) Care dintre următoarele relații sunt adevărate:
a) $c_p > c_v$; b) $c_p < c_v$; c) $0 \leq k \leq 1$; d) $k > 1$;
e) k nu depinde de temperatură; f) k este funcție de temperatură.

5) Dacă pentru aer, la 0^oC avem $c = 1,227\ kJ/kgK$ iar $M_{aer} = 28,96\ kg/kmol$, atunci $C_M\ [kJ/kmol \cdot K]$ este:
a) $C_M = 30\ kJ/kmol \cdot K$; b) $C_M = 35,534\ kJ/kmol \cdot K$;
c) $C_M = 53,350\ kJ/kmol \cdot K$ d) $C_M = 23,855\ kJ/kmol \cdot K$
e) nici una din variantele a, b, c, d; f) $C_M = 50\ kJ/kmol \cdot K$

6) Precizați care este relația corectă pentru calculul căldurii specifice medii pe un interval de temperaturi $[t_1, t_2]$.
a) $\left.\overline{c}\right|_{t_1}^{t_2} = a - b \cdot \dfrac{t_1 + t_2}{2}$; b) $\left.\overline{c}\right|_{t_1}^{t_2} = a + b \cdot \dfrac{t_1 + t_2}{2}$;
c) $\left.\overline{c}\right|_{t_1}^{t_2} = \dfrac{\left.\overline{c}\right|_0^{t_2} t_2 - \left.\overline{c}\right|_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}$; d) $\left.\overline{c}\right|_{t_1}^{t_2} = \dfrac{\left.\overline{c}\right|_0^{t_2} + \left.\overline{c}\right|_0^{t_1}}{2}$;
e) $\left.\overline{c}\right|_{t_1}^{t_2} = \dfrac{\left.\overline{c}\right|_0^{t_2} t_2 - \left.\overline{c}\right|_0^{t_1} t_1}{2}$; f) nici una din relațiile de mai sus.

CAPITOLUL 4

AMESTECURI DE GAZE PERFECTE

4.1. Relații de calcul

a) Temperatura amestecului :

$$T_i = T_{am} \tag{4.1.}$$

în care indicele „i” face referire la componentul i din amestec, iar indicele „am” face referire la amestec.

b) Masa amestecului :
$$m_{am} = \sum_{i=1}^{n} m_i \tag{4.2.}$$

c) Participația masică :
$$g_i = \frac{m_i}{m_{am}} \tag{4.3.}$$

$$\sum_{i=1}^{n} g_i = 1 \tag{4.4.}$$

d) Legea lui Dalton :
$$p_{am} = \sum_{i=1}^{n} p_i \tag{4.5.}$$

p_i - reprezintă presiunea parțială a componentului i aflat în amestec

e) Constanta generală a amestecului :

$$R_{am} = \sum_{i=1}^{n} g_i \cdot R_i \tag{4.6.}$$

f) Legea lui Amagat :

$$V_{am} = \sum_{i=1}^{n} V_i \tag{4.7.}$$

V_i - reprezintă volumul ocupat de componentul i adus la aceeaşi presiune şi la aceeaşi temperatură cu ale amestecului. V_i se numeşte volum parțial.

g) Participația volumică :
$$r_i = \frac{V_i}{V} \tag{4.8.}$$

$$\sum_{i=1}^{n} r_i = 1 \tag{4.9.}$$

h) Densitatea amestecului :
$$\rho_{am} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot \rho_i \tag{4.10.}$$

în care $\rho_i = \dfrac{p_{am}}{R_i \cdot T_{am}}$ (4.11.)

i) Masa molară aparentă a amestecului :

$$M_{am} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot M_i \tag{4.12.}$$

j) Presiunea parțială a componentului i din amestec :

$$p_i = r_i \cdot p_{am} \tag{4.13.}$$

k) Relația dintre participația masică şi volumică :

$$r_i = g_i \cdot \frac{R_i}{\sum_{i=1}^{n} g_i \cdot R_i} = g_i \cdot \frac{\frac{1}{M_i}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{g_i}{M_i}} \tag{4.14.}$$

$$g_i = \frac{r_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^{n} r_i \cdot M_i} \tag{4.15.}$$

l) Căldurile specifice ale amestecului de gaze :

$$\overline{c}_{am} = \sum_{i=1}^{n} g_i \cdot \overline{c}_i \quad [J/kg \cdot K] \tag{4.16.}$$

$$\overline{C}_{M,am} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot \overline{C}_{Mi} \quad [J/kmol \cdot K] \tag{4.17.}$$

$$\overline{c}_{N,am} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot \overline{c}_{Ni} \quad [J/m_N^3 \cdot K] \tag{4.18.}$$

m) Exponentul adiabatic al amestecului de gaze :

$$\overline{k}_{am} = \frac{\overline{c}_{pam}}{\overline{c}_{Vam}} = 1 + \frac{R_{am}}{\overline{c}_{Vam}} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{n} g_i \cdot R_i}{\sum_{i=1}^{n} g_i \cdot \overline{c}_{Vi}} \tag{4.19.}$$

n) Energia internă specifică a amestecului de gaze :

$$u_{am} = \sum_{i=1}^{n} g_i \cdot u_i \quad [J/kg] \tag{4.20.}$$

o) Entalpia specifică a amestecului de gaze :

$$h_{am} = \sum_{i=1}^{n} g_i \cdot h_i \quad [J/kg] \tag{4.21.}$$

p) Viscozitatea dinamică a amestecului :

$$\eta_{am} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{r_i}{\eta_i}} \quad [Pa \cdot s] \tag{4.22.}$$

q) Viscozitatea cinematică a amestecului :

$$\nu_{am} = \frac{\eta_{am}}{\rho_{N,am}} \quad [m^2/s] \tag{4.23.}$$

r) Conductibilitatea termică a amestecului :

$$\lambda_{am} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot \lambda_i \tag{4.24.}$$

4.2. Probleme rezolvate

4.2.1. Un motor de gaz aspiră un amestec format dintr-un gaz, având $R_g = 714{,}2 \ J/kg \cdot K$ şi aer, în proporție masică de $1:14$. Să se determine masa şi volumul specific al amestecului din cilindrul motorului, ştiind că volumul cilindrului este de $0{,}6 \ dm^3$, iar presiunea şi temperatura amestecului de gaze au valorile de $970 \ mbar$, respectiv $350 \ K$.

Rezolvare :

Masa amestecului de gaze se determină din ecuația caracteristică de stare :

$$p_{am} \cdot V_{am} = m_{am} \cdot R_{am} \cdot T_{am}$$

constanta R_{am} a amestecului se calculează cu relația (4.6.) şi cu ajutorul anexei 11 astfel :

$$R_{am} = \sum_{i=1}^{n} g_i \cdot R_i = g_g \cdot R_g + g_{aer} \cdot R_{aer} = \frac{1}{15} \cdot 714{,}2 + \frac{14}{15} \cdot 287{,}041 =$$
$$= 315{,}518 \ J/kg \cdot K$$

Deci : $$m_{am} = \frac{p_{am} \cdot V_{am}}{R_{am} \cdot T_{am}} = \frac{970 \cdot 10^2 \cdot 0{,}6}{315{,}518 \cdot 350} = 0{,}527 \ kg$$

Volumul specific al amestecului din cilindrul motorului cu gaz este :

$$v_{am} = \frac{V_{am}}{m_{am}} = \frac{0{,}6}{0{,}527} = 1{,}1385 \ m^3/kg$$

4.2.2. Un analizor pentru gazele de evacuare ale unui automobil indică următoarele concentrații masice : $g_{O_2} = 0{,}18$ **;** $g_{CO_2} = 0{,}16$ **;** $g_{N_2} = 0{,}32$ **;** $g_{H_2O} = 0{,}24$ **;** $g_{CO} = 0{,}1$ **. Să se determine :**

a) participațiile volumice r_i **;**

b) constanta amestecului R_{am} **;**

c) căldura specifică la presiune constantă a amestecului, dacă temperatura acestuia este de $200^\circ C$ **;**

Rezolvare :

a) Aplicând relația (4.14.) şi ținând seama de relația : $R = \dfrac{R_M}{M}$.

Rezultă : $r_i = \dfrac{\dfrac{g_i}{M_i}}{\sum\limits_{i=1}^{5} \dfrac{g_i}{M_i}}$

Explicitând semnele şi înlocuind numeric obținem :

$$r_{O_2} = \frac{\dfrac{g_{O_2}}{M_{O_2}}}{\dfrac{g_{O_2}}{M_{O_2}} + \dfrac{g_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \dfrac{g_{N_2}}{M_{N_2}} + \dfrac{g_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \dfrac{g_{CO}}{M_{CO}}} =$$

$$= \frac{\dfrac{0{,}18}{32}}{\dfrac{0{,}18}{32} + \dfrac{0{,}16}{44} + \dfrac{0{,}32}{28} + \dfrac{0{,}24}{18} + \dfrac{0{,}1}{28}} = 0{,}150$$

$$r_{CO_2} = \frac{\frac{g_{CO_2}}{M_{CO_2}}}{\sum \frac{g_i}{M_i}} = \frac{\frac{0,16}{44}}{0,0376} = 0,097$$

$$r_{N_2} = \frac{\frac{g_{N_2}}{M_{N_2}}}{\sum \frac{g_i}{M_i}} = \frac{\frac{0,32}{28}}{0,0376} = 0,304$$

$$r_{H_2O} = \frac{\frac{g_{H_2O}}{M_{H_2O}}}{\sum \frac{g_i}{M_i}} = \frac{\frac{0,24}{18}}{0,0376} = 0,354$$

$$r_{CO} = \frac{\frac{g_{CO}}{M_{CO}}}{\sum \frac{g_i}{M_i}} = \frac{\frac{0,1}{28}}{0,0376} = 0,095$$

Verificăm rezultatele obținute cu relația (4.9.) :

$\sum r_i = 1$, adică $0,150 + 0,097 + 0,304 + 0,354 + 0,095 = 1$

b) Constanta generală a amestecului se calculează cu relația (4.6.). Astfel :

$$R_{am} = \sum g_i \cdot R_i = g_{O_2} \cdot R_{O_2} + g_{CO_2} \cdot R_{CO_2} + g_{N_2} \cdot R_{N_2} + g_{H_2O} \cdot R_{H_2O} + g_{CO} \cdot R_{CO} =$$

$$= \left(\frac{g_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{g_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{g_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{g_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{g_{CO}}{M_{CO}} \right) \cdot R_M = 0,0376 \cdot 8314,3 =$$

$$= 312,573 \; [J/kg \cdot K]$$

c) Căldura specifică la presiune constantă se calculează cu relația (4.16.).

Deci: $\quad c_{pam} = \sum g_i \cdot c_{pi}$

Din anexa 13 se citesc valorile căldurilor specifice la presiune constantă ale fiecărui gaz din amestec. Astfel se obține :

$$\bar{c}_{pam} = g_{O_2} \cdot \bar{c}_{pO_2} + g_{CO_2} \cdot \bar{c}_{pCO_2} + g_{N_2} \cdot \bar{c}_{pN_2} + g_{H_2O} \cdot \bar{c}_{pH_2O} + g_{CO} \cdot \bar{c}_{pCO}$$

$$\overline{c}_{pam} = 0{,}18 \cdot 0{,}9630 + 0{,}16 \cdot 0{,}9927 + 0{,}32 \cdot 1{,}0517 + 0{,}24 \cdot 4{,}501 + 0{,}1 \cdot 1{,}0584 =$$
$$= 1{,}8547 \ kJ/kg \cdot K$$

4.2.3. Într-o butelie se află un amestec de gaze la presiunea de $5\ bar$ şi temperatura de $500^{\bullet}C$. Compoziția amestecului este următoarea : $5\ kg\ O_2$, $3\ kg\ CO_2$ şi $2\ kg\ N_2$. Să se determine :

a) participațiile masice ale gazelor componente g_i ;
b) participațiile volumice ale gazelor componente r_i ;
c) volumul buteliei care conține amestecul de gaze ;
d) masa moleculară aparentă a amestecului ;
e) exponentul adiabatic.

Rezolvare :

a) Din relațiile (4.2.) şi (4.3.) rezultă :

$$g_i = \frac{m_i}{m_{am}} \ ; \ m_{am} = m_{O_2} + m_{CO_2} + m_{N_2} = 10 \ kg$$

$$m_{O_2} = 5 \ kg \ ; \ g_{O_2} = \frac{5}{10} = 0{,}5$$

$$m_{CO_2} = 3 \ kg \ ; \ g_{CO_2} = \frac{3}{10} = 0{,}3$$

$$m_{N_2} = 2 \ kg \ ; \ g_{N_2} = \frac{2}{10} = 0{,}2$$

b) Cunoscând participațiile masice, participațiile volumice se determină cu relația (4.14.) astfel :

$$r_i = \frac{\dfrac{g_i}{M_i}}{\sum \dfrac{g_i}{M_i}}$$; masele molare se iau din anexa 11.

Deci: $$r_{O_2} = \frac{\dfrac{g_{O_2}}{M_{O_2}}}{\dfrac{g_{O_2}}{M_{O_2}} + \dfrac{g_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \dfrac{g_{N_2}}{M_{N_2}}} = \frac{\dfrac{0{,}5}{32}}{\dfrac{0{,}5}{32} + \dfrac{0{,}3}{44} + \dfrac{0{,}2}{28}} = \frac{\dfrac{0{,}5}{32}}{0{,}02958} = 0{,}528$$

$$r_{CO_2} = \frac{\frac{g_{CO_2}}{M_{CO_2}}}{\sum \frac{g_i}{M_i}} = \frac{\frac{0,3}{44}}{0,02958} = 0,2305$$

$$r_{N_2} = \frac{\frac{g_{N_2}}{M_{N_2}}}{\sum \frac{g_i}{M_i}} = \frac{\frac{0,2}{28}}{0,02958} = 0,2415$$

Se verifică rezultatele obținute cu ajutorul relației (4.9.)

$$\sum r_i = 0,528 + 0,2305 + 0,2415 = 1$$

c) Volumul buteliei se determină din ecuația de stare a amestecului :

$$p_{am} \cdot V_{am} = m_{am} \cdot R_{am} \cdot T \Rightarrow V_{am} = \frac{m_{am} \cdot R_{am} \cdot T}{p_{am}}$$

Constanta generală a amestecului exprimată prin relația (4.6.) este :

$$R_{am} = \sum g_i \cdot R_i = \frac{g_{O_2}}{M_{O_2}} \cdot R_M + \frac{g_{CO_2}}{M_{CO_2}} \cdot R_M + \frac{g_{N_2}}{M_{N_2}} \cdot R_M =$$

$$\left(\frac{0,5}{32} + \frac{0,3}{44} + \frac{0,2}{28}\right) \cdot \cdot 8314,3 = 245,937 \; [J/kg \cdot K]$$

Deci :

$$V_{am} = \frac{10 \cdot 245,937 \cdot 773,15}{5 \cdot 10^5} = 3,803 \; m^3$$

d) Masa molară aparentă este dată de relația :

$$M_{aer} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{M_i}} = \frac{1}{\frac{g_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{g_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{g_{N_2}}{M_{N_2}}} = \frac{1}{\frac{0,5}{32} + \frac{0,3}{44} + \frac{0,2}{28}} = 33,8 \; [kg/kmol]$$

e) Pentru a aplica relația (4.19) de calcul a exponentului adiabatic, trebuie să calculăm mai întâi $\overline{c}_{pam}$ şi $\overline{c}_{Vam}$.

Din relația (4.16.) rezultă :

$$\overline{c}_{pam} = \sum g_i \cdot \overline{c}_{pi} = g_{O_2} \cdot \overline{c}_{pO_2} + g_{CO_2} \cdot \overline{c}_{pCO_2} + g_{N_2} \cdot \overline{c}_{pN_2}$$

Căldurile specifice la presiune constantă pentru temperatura de $500^\circ C$ se iau din anexa 13.

$$\overline{c}_{pam} = 0,5 \cdot 1,0484 + 0,3 \div 1,1547 + 0,2 \cdot 1,1154 = 1,09369 \; kJ/kg \cdot K$$

$$\bar{c}_{Vam} = \bar{c}_{pam} - R_{am} = 1093{,}69 - 245{,}937 = 847{,}75 \;\; J/kg \cdot K$$

Rezultă că : $k = \dfrac{1093{,}69}{847{,}75} = 1{,}3$.

4.2.4. Un motor cu aprindere prin comprimare aspiră aer pur care la sfârşitul comprimării ajunge la temperatura de $600^\circ C$. Să se calculeze căldura specifică medie la presiune constantă dacă temperatura inițială a aerului este de $100^\circ C$. Se ştie că aerul conține $79\%\ N_2$ şi $21\%\ O_2$.

Rezolvare :

Aerul reprezintă un amestec de gaze cu următoarele specificații volumice : $r_{O_2} = 0{,}21$; $r_{N^2} = 0{,}79$.

Din relația (4.16.) se obține :

$$\bar{c}_{pam}\Big|_{100}^{600} = \sum_{i=1}^{n} g_i \cdot \bar{c}_{pi}\Big|_{100}^{600}$$

Explicitând suma rezultă:

$$\bar{c}_{paer}\Big|_{100}^{600} = g_{O_2} \cdot \bar{c}_{pO_2}\Big|_{100}^{600} + g_{N_2} \cdot \bar{c}_{pN_2}\Big|_{100}^{600}$$

Folosind relația (4.15.), se calculează participațiile masice :

$$g_{O_2} = \frac{r_{O_2} \cdot M_{O_2}}{r_{O_2} \cdot M_{O_2} + r_{N_2} \cdot M_{N_2}} = \frac{0{,}21 \cdot 32}{0{,}21 \cdot 32 + 0{,}79 \cdot 28} = 0{,}233$$

$$g_{N_2} = \frac{r_{N_2} \cdot M_{N_2}}{r_{O_2} \cdot M_{O_2} + r_{N_2} \cdot M_{N_2}} = \frac{0{,}79 \cdot 28}{0{,}21 \cdot 32 + 0{,}79 \cdot 28} = 0{,}767$$

Cu ajutorul anexei 13 şi relației (3.12.) calculăm :

$$\bar{c}_{pO_2}\Big|_{100}^{600} = \frac{\bar{c}_{pO_2}\Big|_{0}^{600} \cdot 600 - \bar{c}_{pO_2}\Big|_{0}^{100} \cdot 100}{600 - 100} = \frac{1{,}0689 \cdot 600 - 0{,}9337 \cdot 100}{500} =$$

$$= 1{,}09594 \;\; kJ/kg \cdot K$$

$$\bar{c}_{pN_2}\Big|_{100}^{600} = \frac{\bar{c}_{pN_2}\Big|_0^{600} \cdot 600 - \bar{c}_{pN_2}\Big|_0^{100} \cdot 100}{600 - 100} = \frac{1{,}1392 \cdot 600 - 1{,}0421 \cdot 100}{500} =$$

$$= 1{,}15862 \ \ kJ/kg \cdot K$$

Înlocuind valorile obținute rezultă :

$$\bar{c}_{paer}\Big|_{100}^{600} = 0{,}233 \cdot 1{,}09594 + 0{,}767 \cdot 1{,}15862 = 1{,}144015 \ \ kJ/kg \cdot K$$

4.2.5. Gazele rezultate dintr-un proces de ardere, aflate la presiunea de $1{,}1 \ bar$ şi temperatura de $850 \ K$, se compun, în participații volumice din : $r_{CO_2} = 0{,}14$; $r_{O_2} = 0{,}07$; $r_{N_2} = 0{,}79$. Să se determine masa molară aparentă şi masa specifică a amestecului, precum şi participațiile masice ale componenților din gazele arse.

Rezolvare :

Masa molară aparentă a gazelor rezultate din ardere se determină cu relația (4.12.) şi cu ajutorul anexei 11 din care se iau valorile maselor molare ale gazelor din amestec.

Deci :

$$M_{am} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot M_i = r_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + r_{O_2} \cdot M_{O_2} + r_{N_2} \cdot M_{N_2} =$$

$$= 0{,}14 \cdot 44 + 0{,}07 \cdot 32 + 0{,}79 \cdot 28 = 30{,}52 \ \ kg/kmol$$

Constanta gazului este dată de relația :

$$R_{am} = \frac{R_M}{M_{am}} = \frac{8314{,}3}{30{,}52} = 272{,}4 \ \ J/kg \cdot K$$

Din ecuația caracteristică de stare, scrisă pentru $1 \ m^3$ de amestec, se deduce expresia densității gazelor de ardere.

$$\rho_{am} = \frac{p_{am}}{R_{am} \cdot T_{am}} = \frac{1{,}1 \cdot 10^5}{272{,}4 \cdot 850} = 0{,}475 \ \ kg/m^3$$

Participațiile masice ale componenților din gazele de ardere sunt date de relația (4.15.).

$$g_{CO_2} = r_{CO_2} \cdot \frac{M_{CO_2}}{r_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + r_{O_2} \cdot M_{O_2} + r_{N_2} \cdot M_{N_2}} =$$

$$= \frac{0{,}14 \cdot 44}{0{,}14 \cdot 44 + 0{,}07 \cdot 32 + 0{,}79 \cdot 28} = 0{,}201$$

$$g_{O_2} = \frac{r_{O_2} \cdot M_{O_2}}{r_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + r_{O_2} \cdot M_{O_2} + r_{N_2} \cdot M_{N_2}} =$$

$$= \frac{0{,}07 \cdot 32}{0{,}14 \cdot 44 + 0{,}07 \cdot 32 + 0{,}79 \cdot 28} = 0{,}073$$

$$g_{N_2} = \frac{r_{N_2} \cdot M_{N_2}}{r_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + r_{O_2} \cdot M_{O_2} + r_{N_2} \cdot M_{N_2}} =$$

$$= \frac{0{,}79 \cdot 28}{0{,}14 \cdot 44 + 0{,}07 \cdot 32 + 0{,}79 \cdot 28} = 0{,}726$$

4.2.6. Măsurând debitul de gaze de evacuare ale unui motor într-un anumit regim s-a găsit valoarea $\dot{V}_N = 300 \ m_N^3/h$. Temperatura gazelor la ieşirea din motor este $t_g' = 600^\circ C$, iar la ieşirea în atmosferă este $t_g'' = 200^\circ C$. Gazele au următoarea compoziţie chimică exprimată în participaţii volumice : $r_{CO_2} = 9\%$, $r_{O_2} = 12{,}5\%$, $r_{H_2O} = 12\%$, $r_{N_2} = 76{,}5\%$.

Se cer :

a) **Fluxul de căldură a gazelor la ieşirea din motor $\dot{Q}_{g'}$;**

b) **Fluxul de căldură a gazelor la ieşirea în atmosferă $\dot{Q}_{g''}$;**

c) **Fluxul de căldură cedat de gazele de ardere de-a lungul tronsonului de evacuare $\dot{Q}_g$;**

d) **Căldura specifică medie la presiune constantă $\left.\overline{c}_{Np}\right|_{t_g'}^{t_g''}$.**

Rezolvare :

a) Fluxul de căldură $\dot{Q}_{g'}$ la ieşirea din motor :

$$\dot{Q}_{g'} = \dot{V}_{Ng} \cdot \left.\overline{c}_{Np}\right|_0^{t_g'} \cdot t_g' = \frac{3 \cdot 10^2}{3600} \cdot 1{,}5798 \cdot 600 = 78{,}99 \ kW$$

în care : $\overline{c}_{Np}\Big|_0^{t_g'}$ se calculează pe baza relaţiei (4.18.) şi a anexei 13 la temperatura $t_g' = 600^\circ C$.

$$\overline{c}_{Np}\Big|_0^{t_g'} = \sum r_i \cdot \overline{c}_{Npi}\Big|_0^{t_g'} = 0{,}09 \cdot 2{,}0411 + 0{,}125 \cdot 1{,}4160 + 0{,}12 \cdot 1{,}16148 +$$
$$+ 0{,}765 \cdot 1{,}3402 = 1{,}579824 \ \left[kJ/m_N^3 \cdot K \right]$$

b) Fluxul de căldură $\dot{Q}_{g''}$ la ieşirea în atmosferă :

$$\dot{Q}_{g''} = \dot{V}_{Ng} \cdot \overline{c}_{Np}\Big|_0^{t_g''} \cdot t_g'' = \frac{300 \cdot 2{,}577007}{3600} \cdot 200 = 42{,}96 \ kW$$

$$\overline{c}_{Np}\Big|_0^{t_g''} = \sum r_i \cdot \overline{c}_{Npi}\Big|_0^{t_g''} = 0{,}69 \cdot 1{,}7873 + 0{,}125 \cdot 1{,}3352 + 0{,}12 \cdot 1{,}5223 +$$
$$+ 0{,}765 \cdot 1{,}2996 = 2{,}577007 \ \left[kJ/m_N^3 \cdot K \right]$$

c) Fluxul de căldură cedat mediului de gazele de evacuare de-a lungul tronsonului de evacuare $\dot{Q}_g$:

$$\dot{Q}_g = \dot{Q}_{g'} - \ddot{Q}_{g''} = 78{,}99 - 42{,}96 = 36{,}03 \ kW$$

d) Căldura specifică medie la presiune constantă $\overline{c}_{Np}\Big|_{t_g'}^{t_g''}$:

$$\overline{c}_{Np}\Big|_{t_g'}^{t_g''} = \frac{\overline{c}_{Np}\Big|_0^{t_g''} \cdot t_g'' - \overline{c}_{Np}\Big|_0^{t_g'} \cdot t_g'}{t_g'' - t_g'} = \frac{2{,}577007 \cdot 200 - 1{,}579824 \cdot 600}{200 - 600} =$$
$$= 1{,}0812 \ \left[kJ/m_N^3 \cdot K \right]$$

4.2.7. Un amestec de gaze aflat la starea normală, are următoarea compoziţie : $r_{N_2} = 79\%$; $r_{CO_2} = 16\%$; $r_{O_2} = 5\%$. Să se determine :

a) masa molară aparentă şi constanta amestecului ;
b) densitatea, viscozitatea dinamică şi cinematică a amestecului ;
c) căldura specifică şi coeficientul de conductibilitate termică a amestecului.

Se dau valorile proprietăţilor termofizice ale gazelor componente la $t = 0^\circ C$:

$M_{N_2} = 28 \ kg/kmol$; $M_{CO_2} = 44 \ kg/kmol$; $M_{O_2} = 32 \ kg/kmol$

$c_{p,N_2} = 1{,}0393\ kJ/kg\cdot K$; $c_{p,CO_2} = 0{,}8184\ kJ/kg\cdot K$;
$c_{p,O_2} = 0{,}9148\ kJ/kg\cdot K$

$\eta_{N_2} = 16{,}6\cdot 10^{-6}\ Pa\cdot s$; $\eta_{CO_2} = 13{,}82\cdot 10^{-6}\ Pa\cdot s$; $\eta_{O_2} = 19{,}2\cdot 10^{-6}\ Pa\cdot s$

$\lambda_{N_2} = 0{,}0238\ W/m\cdot K$; $\lambda_{CO_2} = 0{,}0142\ W/m\cdot K$; $\lambda_{O_2} = 0{,}0242\ W/m\cdot K$

Rezolvare :

a) Masa molară aparentă a amestecului de gaze este :

$$M_{am} = \sum M_i \cdot r_i = 28\cdot 0{,}79 + 44\cdot 0{,}16 + 32\cdot 0{,}05 = 30{,}76\ kg/kmol$$

iar constanta specifică are valoarea :

$$R_{am} = \frac{R_M}{M_{am}} = \frac{8314{,}3}{30{,}76} = 270{,}3\ J/kg\cdot K$$

b) Densitatea la starea normală rezultă din expresia :

$$\rho_{N_a} = \frac{M_{am}}{V_{M,N}} = \frac{30{,}76}{22{,}414} = 1{,}372\ kg/m_N^3$$

Viscozitatea dinamică a unui amestec de gaze se determină cu relația (4.22.) :

$$\eta_{am} = \frac{1}{\sum (r_i/\eta_i)} = \frac{1\cdot 10^{-6}}{\frac{0{,}79}{16{,}6} + \frac{0{,}16}{13{,}82} + \frac{0{,}05}{19{,}2}} = 16{,}206\cdot 10^{-6}\ Pa\cdot s$$

Ținând cont că amestecul se află la starea normală, viscozitatea cinematică se determină uşor cu relația (4.23.) :

$$\nu_{am} = \frac{\eta_{am}}{\rho_{N,am}} = \frac{16{,}206\cdot 10^{-6}}{1{,}372} = 11{,}81\cdot 10^{-6}\ m^2/s$$

c) Pentru calculul căldurilor specifice masice este necesar ca în prealabil să se determine participațiile volumice ale gazelor în amestec :

$$g_{N_2} = r_{N_2}\cdot \frac{M_{N_2}}{M_{am}} = 0{,}79\cdot \frac{28}{30{,}76} = 0{,}720$$

$$g_{CO_2} = r_{CO_2}\cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{am}} = 0{,}16\cdot \frac{44}{30{,}76} = 0{,}228$$

$$g_{O_2} = r_{O_2}\cdot \frac{M_{O_2}}{M_{am}} = 0{,}05\cdot \frac{32}{30{,}76} = 0{,}052$$

Căldura specifică masică la presiune constantă a amestecului este :

$$c_{p,am} = \sum g_i \cdot c_{p,i} = 1039{,}3 \cdot 0{,}72 + 818{,}4 \cdot 0{,}228 + 914{,}8 \cdot 0{,}052 = 982{,}46 \ \ J/kg \cdot K$$

Folosind relația Robert-Mayer, valoarea căldurii specifice masice la volum constant a amestecului este : căldura specifică la volum constant este dată de relația:

$$c_{V,am} = c_{p,am} - R_{am} = 982{,}46 - 270{,}3 = 712{,}16 \ \ J/kg \cdot K$$

Coeficientul de conductibilitate termică a unui amestec de gaze se determină cu relația (4.24.) :

$$\lambda_{am} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot \lambda_i = 0{,}023 \cdot 0{,}79 + 0{,}0142 \cdot 0{,}16 + 0{,}05 \cdot 0{,}0242 = 0{,}02228 \ \ W/m \cdot K$$

4.2.8. Se consideră două rezervoare rigide ($V =$ const.) care pot comunica între ele printr-un robinet R (fig. 4.1.). În rezervorul 1 se află azot la presiunea $p_1 = 0{,}4 \ MPa$ şi temperatura $t_1 = 100^\circ C$, volumul rezervorului fiind $V_1 = 1 \ m^3$. În rezervorul 2 se află CO_2 la $p_2 = 0{,}1 \ MPa$ şi temperatura $t_2 = 300^\circ C$, volumul rezervorului fiind $V_2 = 3 \ m^3$. După deschiderea robinetului şi realizarea amestecării prin difuziune, să se determine :

a) volumul amestecului V_{am} ;

b) **temperatura amestecului t_{am} ;**

c) presiunea amestecului p_{am} .

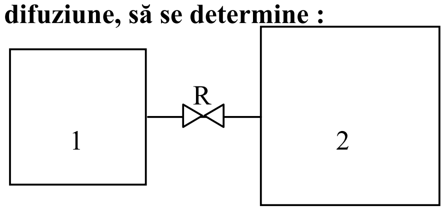


Fig. 4.1.

Rezolvare :

a) Volumul amestecului va fi egal cu suma volumelor celor două incinte rigide :

$$V_{am} = V_1 + V_2 = 4 \ m^3$$

b) Temperatura amestecului se obține din ecuația de bilanț termic scris față de $0^\circ C$

$$m\overline{c}_V\Big|_0^t \cdot t = m_{N_2}\overline{c}_{V,N_2}\Big|_0^{t_1} \cdot t_1 + m_{CO_2}\overline{c}_{V,CO_2}\Big|_0^{t_2} \cdot t_2$$

în care : $m = m_{N_2} + m_{CO_2}$

\- m_{N_2} - masa azotului ;

- m_{CO_2} - masa de CO_2;

- $\left.\overline{c}_{V,N_2}\right|_0^{t_1}$ - căldura specifică medie la volum constant a azotului pe intervalul de temperatură ;

- $\left.\overline{c}_{V,CO_2}\right|_0^{t_2}$ - căldura specifică medie la volum constant a CO_2 pe intervalul de temperatură ;

- $\left.\overline{c}_V\right|_0^t$ - căldura specifică a amestecului în intervalul $(0 \div t)^\circ C$ şi care se determină cu relaţia (4.16.) :

$$\left.\overline{c}_V\right|_0^t = \sum g_i \cdot \overline{c}_{V_i} = \frac{m_{N_2}}{m} \cdot \left.\overline{c}_{V,N_2}\right|_0^t + \frac{m_{CO_2}}{m} \cdot \left.\overline{c}_{V,CO_2}\right|_0^t$$

Înlocuind $\left.\overline{c}_V\right|_0^t$ în ecuaţia de bilanţ termic se obţine :

$$\left(m_{N_2} \cdot \left.\overline{c}_{V,N_2}\right|_0^t + m_{CO_2} \cdot \left.\overline{c}_{V,CO_2}\right|_0^t \right) \cdot t = m_{N_2} \cdot \left.\overline{c}_{V,N_2}\right|_0^{t_1} \cdot t_1 +$$

$$+ m_{CO_2} \cdot \left.\overline{c}_{V,CO_2}\right|_0^{t_2} \cdot t_2$$

Deci temperatura amestecului va fi :

$$t = \frac{m_{N_2} \cdot \left.\overline{c}_{V,N_2}\right|_0^{t_1} \cdot t_1 + m_{CO_2} \cdot \left.\overline{c}_{V,CO_2}\right|_0^{t_2} \cdot t_2}{m_{N_2} \cdot \left.\overline{c}_{V,N_2}\right|_0^t + m_{CO_2} \cdot \left.\overline{c}_{V,CO_2}\right|_0^t}$$

sau în general :

$$t = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \left.\overline{c}_{Vi}\right|_0^{t_1} \cdot t_1}{\sum_{i=1}^{n} m_i \left.\overline{c}_{Vi}\right|_0^t}$$

Ţinând cont de datele problemei se obţine :

$$m_{N_2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_{N_2} \cdot T_1} = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot M_{N_2}}{R_M \cdot T_1} = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 1,28}{8314 \cdot 373} = 3,611\ kg$$

$$m_{CO_2} = \frac{p_2 \cdot V_2}{R_{CO_2} \cdot T_2} = \frac{p_2 \cdot V_2 \cdot M_{CO_2}}{R_M \cdot T_2} = \frac{0{,}1 \cdot 10^6 \cdot 3{,}44}{8314 \cdot 573} = 2{,}770 \ kg$$

$$m = m_{N_2} + m_{CO_2} = 6{,}381 \ kg$$

Din anexa 14 la $t_1 = 100^\circ C$ pentru N_2 şi la $t_2 = 300^\circ C$ pentru CO_2 se determină :

$$\overline{c}_{V,N_2}\Big|_0^{100} = \frac{\overline{c}_{p,N_2}\Big|_0^{100}}{k_{N_2}} = \frac{1{,}040}{1{,}4} = 0{,}7428 \ kJ/kg \cdot K$$

$$\overline{c}_{V,CO_2}\Big|_0^{300} = \frac{\overline{c}_{p,CO_2}\Big|_0^{300}}{k_{CO_2}} = \frac{0{,}949}{1{,}33} = 0{,}7135 \ kJ/kg \cdot K$$

Întrucât temperatura t de determinare a căldurilor specifice $\overline{c}_{V,N_2}\Big|_0^{t}$ şi $\overline{c}_{V,CO_2}\Big|_0^{t}$ este necunoscută, se efectuează un calcul prin încercări.

Astfel se alege $t = 182^\circ C$ la care din acelaşi tabel se citesc :

$$\overline{c}_{V,N_2}\Big|_0^{182} = \frac{\overline{c}_{p,N_2}\Big|_0^{182}}{k_{N_2}} = \frac{1{,}04246}{1{,}4} = 0{,}7446 \ kJ/kg \cdot K$$

$$\overline{c}_{V,CO_2}\Big|_0^{182} = \frac{\overline{c}_{p,CO_2}\Big|_0^{182}}{k_{CO_2}} = \frac{0{,}90208}{1{,}33} = 0{,}6782 \ kJ/kg \cdot K$$

($k = 1{,}4$ - pentru gaze biatomice ; $k = 1{,}33$ - pentru gaze triatomice).

Cu aceste valori rezultă :

$$t = \frac{3{,}611 \cdot 0{,}7446 \cdot 100 + 2{,}77 \cdot 0{,}6782 \cdot 300}{3{,}611 \cdot 0{,}7446 + 2{,}77 \cdot 0{,}6782} = 182{,}26^\circ C$$

Diferența dintre t ales şi cel calculat este mică, deci calculul se consideră bun.

c) Presiunea amestecului, rezultă din legea gazelor perfecte, aplicată amestecului :

$$p_{am} = \frac{m_{am} \cdot R_{am} \cdot T_{am}}{V_{am}}$$

în care :

$$R_{am} = \sum_{i=1}^{n} R_i \cdot g_i = \frac{R_M}{M_{N_2}} \cdot \frac{m_{N_2}}{m} + \frac{R_M}{M_{CO_2}} \cdot \frac{m_{CO_2}}{m}$$

$$R_{am} = \frac{8314}{28} \cdot \frac{3,611}{6,381} + \frac{8314}{44} \cdot \frac{2,77}{6,381} = 250,05 \ J/kg \cdot K$$

Deci :

$$p_{am} = \frac{6,381 \cdot 250,05 \cdot 455,42}{4} = 181663,51 \ Pa = 0,1816 \ MPa$$

4.3. Probleme propuse

4.3.1. Ce volum ocupă un amestec de gaze compus din $5 \ kg \ aer$, $2 \ kg \ CO_2$ şi $1 \ kg \ N_2$, aflat la presiunea de $6 \ bar$ şi temperatura de $800 \ K$? Să se determine participaţiile volumetrice ale gazelor componente din amestec şi exponentul adiabatic al amestecului gazos.

R : $V_{am} = 2,83 \ m^3$

$r_{aer} = 0,67$; $r_{CO_2} = 0,18$; $r_{N_2} = 0,15$;

$k_{am} = 1,33$

4.3.2. În ce proporţii volumetrice trebuie să se amestece hidrogenul şi azotul pentru ca, la presiunea de $8 \ bar$ şi temperatura de $500 \ K$, volumul specific al amestecului rezultat să fie de $0,85 \ m^3/kg$? Să se determine căldura cedată de către masa de un kilogram din acest amestec, dacă este supus răcirii la volum constant, până când presiunea scade la $4,8 \ bar$.

R : $R_{H_2} = 0,84$; $r_{N_2} = 0,16$;

$q_{12,am} = -682 \ kJ/kg$.

4.3.3. Cunoscând densitatea unui amestec de gaze alcătuit din oxigen şi hidrogen, $\rho_{am} = 1{,}52\ kg/m^3$, la presiunea $p_{am} = 0{,}2\ MPa$ şi temperatura $t_{am} = 27^\circ C$ să se determine :

a) constanta generală R_{am} şi masa molară aparentă M_{am} ;
b) participațiile masice şi volumice ale componentelor.

R : a) $R_{am} = 438{,}59\ J/kg \cdot K$;

$M_{am} = 18{,}9\ kg/kmol$

b) $r_{H_2} = 0{,}436$; $r_{O_2} = 0{,}564$

$g_{H_2} = 0{,}046$; $g_{O_2} = 0{,}954$.

4.3.4. Printr-o conductă metalică circulă un debit $\dot{m} = 400\ kg/h$ de amestec de gaze având la intrare temperatura $t_1 = 556^\circ C$. Trecând prin conductă amestecul de gaze se răceşte la presiune constantă până când temperatura lui devine $t_2 = 44^\circ C$.Ştiind că participațiile volumice ale amestecului sunt $r_{CO_2} = 9\%$; $r_{O_2} = 11\%$; $r_{N_2} = 80\%$ să se determine fluxul orar de căldură cedat de amestec mediului exterior.

R : $M_{am} = 29{,}88\ kJ/kmol$

$$\overline{c}_{p,am}\Big|_{t_1}^{t_2} = 1{,}06\ kJ/kg \cdot K$$

$$\dot{Q}_{1-2} = 217088\ kJ/h$$

4.4. Teste grilă

- *Timp de lucru: 20 min.*
- *Fiecare întrebare se punctează cu 1,5 puncte.*
- *Din oficiu: 1 punct.*

1) Într-un amestec de gaze se găsesc: *1kg O_2, 7 kg N_2,* şi *2 kg CO_2*. Precizați participațiile masice ale gazelor componente.

a) *0,9; 0,3; 0,8;* b) *0,1; 0,7; 0,2;*
c) *0,01; 0,07; 0,02;* d) *1/10; 7/10; 1/5.*

2) Un volum de *$2m^3$* de gaze de evacuare provenite de la un motor conține următoarele gaze: *CO_2, CO, NO_2* şi *C_6H_{14}* (hexan). Cu ajutorul unui analizor s-au măsurat participațiile volumice la trei dintre acestea, obținându-se: $r_{CO_2} = 0{,}7$; $r_{CO} = 0{,}15$; $r_{N_2} = 0{,}05$. Volumul hexanului *(C_6H_{14})* din amestec este:

a) *$0{,}15\ m^3$;* b) *200 l;* c) *$0{,}2\ m^3$;* d) *$0{,}02\ m^3$;*
e) *$200\ dm^3$;* f) *$200\ cm^3$;*

3) Un amestec de *CO_2* şi *NO_2* se află la presiunea de *2bar*. Participațiile volumice sunt $r_{CO_2} = 0{,}7$; $r_{N_2} = 0{,}3$. Presiunile parțiale ale celor doi componenți sunt:

a) $p_{CO_2} = 1{,}4;\ p_{N_2} = 0{,}4;$ b) $p_{CO_2} = 1{,}4;\ p_{N_2} = 0{,}6;$
c) $p_{CO_2} = 1{,}6;\ p_{N_2} = 0{,}4;$ d) $p_{CO_2} = 0{,}6;\ p_{N_2} = 1{,}4;$

4) Precizați constanta unui amestec de *CO_2* şi *NO_2* dacă se cunoaşte $g_{CO_2} = 0{,}7$.

a) R_{am} = *186,5 J/kgK*; b) R_{am} = *168,5 J/kgK;*
c) R_{am} = *288 J/kgK;* d) R_{am} = *0,1865 kJ/kgK*;
e) R_{am} = *0,1685 kJ/kgK;* f) R_{am} = *188,78 J/kgK;*

5) Precizați masa molară aparentă a amestecului de *O_2* şi *N_2* în care $r_{O_2} = 0{,}3$.

a) *32 kg/kmol;* b) *28 kg/kmol;* c) *29,2 kg/kmol;*
d) *25,5 kg/kmol;* e) *60 kg/kmol;* f) *30 kg/kmol.*

6) Precizați căldura specifică la presiune constantă a unui amestec de *O_2* şi *N_2* la *0^oC*. Se cunosc: $g_{O_2} = 0{,}6$; $c_{p_{O_2}} = 0{,}913\ \dfrac{kJ}{kgK}$; $c_{p_{H_2}} = 14{,}235\ \dfrac{kJ}{kgK}$.

a) $c_{p_{am}} = 16{,}242\ \dfrac{kJ}{kgK}$; b) $c_{p_{am}} = 6{,}242\ \dfrac{kJ}{kgK}$;
c) $c_{p_{am}} = 0{,}6242\ \dfrac{kJ}{kgK}$; d) $c_{p_{am}} = 6242\ \dfrac{J}{kgK}$;

CAPITOLUL 5

PRINCIPIUL ÎNTÂI AL TERMODINAMICII

5.1. Relații de calcul

a) Energia cinetică : $E_c = \frac{mw^2}{2}$ (J) (5.1.)

b) Energia potențială : $E_p = mgh$ (J) (5.2.)

în care $g = 9{,}81\ m/s^2$ este accelerația gravitațională, iar h - înălțimea centrului de masă.

c) Energia internă U - este conținutul de energie a sistemului aflat într-o stare oarecare.

Energia internă specifică (raportată la 1 kg de agent termic), u, măsurată în J/kg :

$$U = m \cdot \bar{c}_v\Big|_{t_0}^{t} \cdot t + U_0 \qquad (5.3.)$$

U_0 este energia internă la temperatura $t_0 = 0^\circ C$.

d) Variația energiei interne :

$$dU = m \cdot c_v \cdot dT\ ;\ du = c_v \cdot dT \qquad (5.4.)$$

$$\Delta U = m \cdot \bar{c}_v\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) \qquad (J) \qquad (5.5.)$$

$$\Delta u = \bar{c}_v\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) \qquad (J/kg) \qquad (5.6.)$$

e) Lucrul mecanic de dislocare (de curgere), L_d :

$$L_d = p \cdot V \qquad (J) \qquad (5.7.)$$

$$l_d = p \cdot v \qquad (J/kg) \qquad (5.8.)$$

f) Variația energiei de dislocare (lucrului mecanic de dislocare) :

$$dL_d = d(p \cdot V)$$

$$\Delta L_d = p_1V_1 - p_2V_2 = -\Delta(p \cdot V) \qquad (5.9.)$$

$$\Delta l_d = p_1v_1 - p_2v_2 = -\Delta(p \cdot v) \qquad (5.10.)$$

g) Entalpia, este o mărime definită astfel :

$$H = U + p \cdot V \qquad (J) \qquad (5.11.)$$

$$h = u + p \cdot v \qquad (J/kg) \qquad (5.12.)$$

h) Variația de entalpie :

$$dH = m \cdot c_p \cdot dT\ ;\ dh = c_p \cdot dT \qquad (5.13.)$$

$$\Delta H = m \cdot \overline{c}_p\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) \qquad (J) \qquad (5.14.)$$

$$\Delta h = \overline{c}_p\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) \qquad (J/kg) \qquad (5.15.)$$

i) Schimbul de căldură cu exteriorul :

$$\delta Q = m \cdot c \cdot dT\ ;\ \delta q = c \cdot dT \qquad (5.16)$$

$$Q_{1-2} = m \cdot \overline{c}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) \qquad (J) \qquad (5.17.)$$

$$q_{1-2} = \overline{c}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) \qquad (J/kg) \qquad (5.18.)$$

j) Schimbul de lucru mecanic absolut :

$$\delta L = p \cdot dV\ ;\ \delta l = p \cdot dv \qquad (5.19.)$$

$$L_{1-2} = \int_1^2 p \cdot dV \qquad (J) \qquad (5.20.)$$

$$l_{1-2} = \int_1^2 p \cdot dv \qquad (J/kg) \qquad (5.21.)$$

k) Schimbul de lucru mecanic tehnic :

$$\delta L_t = -V \cdot dp\ ;\ \delta l_t = -v \cdot dp \qquad (5.22.)$$

$$L_{t_{1-2}} = \int_1^2 p \cdot dV \qquad (J) \qquad (5.23.)$$

$$l_{t_{1-2}} = \int_1^2 p \cdot dv \qquad (J/kg) \qquad (5.24.)$$

l) Expresiile matematice ale primului principiu pentru sisteme închise :

$$\delta Q = dU + p \cdot dV = dU + \delta L \qquad (5.25)$$

$$Q_{12} = \Delta U + \int_1^2 p \cdot dV = \Delta U + L_{12} \qquad (5.26)$$

$$q_{12} = \Delta u + \int_1^2 p \cdot dv = \Delta u + l_{12} \qquad (5.27.)$$

m) Expresiile matematice ale primului principiu pentru sisteme deschise :

$$\delta Q = dH - V \cdot dp = dH + \delta L_t \tag{5.28}$$

$$Q_{1-2} = \Delta H - \int_1^2 V \cdot dp = \Delta H + L_{t_{12}} \tag{5.29}$$

$$q_{1-2} = \Delta h - \int_1^2 v \cdot dp = \Delta h + l_{t_{12}} \tag{5.30.}$$

$$q_{12} = \Delta u + v \cdot \Delta p + g \cdot \Delta z + \Delta e_c + l_{t_{12}} \tag{5.31.}$$

unde : $\Delta e_c = \frac{1}{2} \cdot \left(w_2^2 - w_1^2\right)$; $\Delta z = z_2 - z_1$

5.2. Probleme rezolvate

5.2.1. O cantitate de $15\ kg\ aer$ aflată la temperatura inițială $t_1 = 20^\circ C$ este supusă unei succesiuni de procese atingând temperatura $t_2 = 127^\circ C$ apoi $t_3 = 430^\circ C$ și în cele din urmă $t_4 = 580^\circ C$.

Să se determine:

a) variația energiei interne ΔU ;

b) variația entalpiei ΔH .

Rezolvare :

a) Aplicând relația (5.5.) putem scrie :

$$\Delta U = (U_2 - U_1) + (U_3 - U_2) + (U_4 - U_3) = U_4 - U_1 = m \cdot \bar{c}_v\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_4 - t_1);$$

Utilizând metoda redată în capitolul 3, obținem:

$$\bar{c}_p\Big|_{t_1}^{t_4} = 1{,}049\ \ kJ/kg \cdot K$$

Și atunci : $$\bar{c}_v\Big|_{t_1}^{t_4} = \bar{c}_p\Big|_{t_1}^{t_4} - R_{aer} = 1{,}049 - 0{,}287 = 0{,}762\ \ kJ/kg \cdot K$$

$$R_{aer} = \frac{R_M}{M_{aer}} = \frac{8314{,}3}{29} = 0{,}287 \;\; kJ/kg\cdot K$$

Prin urmare : $\Delta U = 15\cdot 0{,}762\cdot(580-20) = 6400{,}8 \;\; kJ$

b) În mod analog :

$$\Delta H = (H_2 - H_1) + (H_3 - H_2) + (H_4 - H_3) = m\cdot \overline{c}_p\Big|_{t_1}^{t_4}\cdot(t_4 - t_1)$$

adică : $\Delta H = 15\cdot 1{,}049\cdot(580-20) = 8811{,}6 \;\; kJ$

5.2.2. Într-un cilindru închis de un piston care se mişcă fără frecare, se află $3 \; kg$ de oxigen. Gazului i se transferă o cantitate de căldură $Q_p = 11.900 \;\; J$ ceea ce determină o creştere de temperatură $\Delta t = 13^\circ C$. Să se determine lucrul mecanic efectuat prin destinderea gazului şi variația energiei interne.

Rezolvare :

Se ştie că $M_{O_2} = 32 \;\; kg/kmol$, ceea ce înseamnă că :

$$R_{O_2} = \frac{R_M}{M_{O_2}} = \frac{8314{,}3}{32} = 259{,}8 \;\; J/kg\cdot K$$

Lucrul mecanic efectuat de gaz în procesul izobar este :

$$L_{12} = \int_1^2 p\cdot dV = p\cdot\int_1^2 dV = p(V_2 - V_1) = pV_2 - pV_1 = m\cdot R_{O_2}\cdot T_2 - m\cdot R_{O_2}\cdot T_1 =$$

$$= m\cdot R_{O_2}\cdot(T_2 - T_1) = m\cdot R_{O_2}\cdot\Delta T = 3\cdot 259{,}8\cdot 13 = 10133 \;\; J$$

Conform relației (5.26.) avem :

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q_{12} - L_{12} = 11900 - 10133 = 1767 \;\; J$$

5.2.3. O cantitate de $3{,}5 \; kg$ gaz are în starea inițială volumul $V_1 = 1 \; m^3$ şi temperatura $T_1 = 300 \;\; K$ şi se destinde la presiunea constantă $p = 3 \;\; bar$ până la $V_2 = 2 \;\; m^3$. Cunoscând ecuația transformării $T = a\cdot V$, unde a=const., să se determine lucrul mecanic şi căldura schimbată cu exteriorul, precum şi variația energiei interne a gazului. Se cunoaşte că $\overline{c}_p\Big|_{t_1}^{t_2} = 10^3 \;\; J/kg\cdot K$.

Rezolvare :

a) Lucrul mecanic schimbat cu exteriorul în procesul izobar $1-2$ este :

$$L_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = p \cdot \int_{V_1}^{V_2} dV = p \cdot (V_2 - V_1) = p \cdot \Delta V = 3 \cdot 10^5 \cdot (2-1) = 3 \cdot 10^5 \ J$$

b) Căldura schimbată cu exteriorul pe izobara $1-2$ este :

$$Q_{12} = m \cdot \overline{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (T_2 - T_1)$$

Dar dacă : $T = a \cdot V$, rezultă : $\dfrac{T_2}{T_1} = \dfrac{V_2}{V_1}$

din care : $T_2 = T_1 \cdot \dfrac{V_2}{V_1} = 300 \cdot \dfrac{2}{1} = 600 \ K$

şi atunci : $Q_{12} = 3{,}5 \cdot 10^3 \cdot (600 - 300) = 1{,}05 \cdot 10^6 \ J$

Conform principiului întâi al termodinamicii :

$$\Delta U = Q_{12} - L_{12}$$

$$\Delta U = 1{,}05 \cdot 10^6 - 0{,}3 \cdot 10^6 = 0{,}705 \cdot 10^6 \ J$$

Se constată că energia internă a gazului creşte, întrucât căldura primită din exterior este mai mare decât lucrul mecanic efectuat de gaz.

5.2.4. În încercarea unui motor cu frână hidraulică, la funcționarea acestuia cu turația de $1200 \ rot/\min$, frâna dezvoltă asupra arborelui motor, un cuplu rezistent $M_{rez} = 1000 \ N \cdot m$. Ştiind că lucrul mecanic consumat de frână se transformă în căldură şi că frâna este răcită cu un debit de apă de $3000 \ kg/h$, la o temperatură inițială de $10^\circ C$, să se determine :

a) puterea motorului ;
b) temperatura apei la ieşirea din frână.

Rezolvare :

a) Cunoscând turația motorului şi valoarea cuplului acestuia $M_{mot} = M_{rez}$, rezultă puterea motorului supus încercării :

$$P_{mot} = M_{mot} \cdot \omega = 1000 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 1200}{60} = 125{,}663 \ kW$$

b) Din expresia (5.26.) a primului principiu şi din relația (3.15.) rezultă :

$$L_{mot} = P_{mot} \cdot \tau = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

unde τ este timpul în secunde.

De unde rezultă : $\Delta T = \frac{P_{mot} \cdot \tau}{\dot{m} \cdot c} = \frac{125663 \cdot 3600}{3000 \cdot 4186} = 36 \ K$

în care valoarea căldurii specifice a apei s-a obținut din anexa 6.

Temperatura inițială a apei de răcire fiind $T_1 = 283{,}15 \ K$, temperatura până la care se încălzeşte apa este :

$$T_2 = T_1 + \Delta T = 283{,}15 + 36 = 319{,}15 \ K$$

respectiv $t_2 = 46^\circ C$.

5.2.5. Un kilogram de gaz perfect, închis într-un cilindru, obturat cu un piston, absoarbe din exterior căldura $q_{12} = 500 \ kJ/kg$. Să se calculeze variația energiei interne a gazului în următoarele ipoteze :

a) Datorită mobilității pistonului, printr-o destindere reversibilă, gazul efectuează un lucru mecanic $l_{12} = 375 \ kJ/kg$;

b) Pistonul cilindrului fiind blocat, căldura absorbită conduce la încălzirea gazului.

Rezolvare :

a) Din expresia (5.27.) primului principiu al termodinamicii, rezultă :

$$u_2 - u_1 = q_{12} - l_{12} = 500 - 375 = 125 \ kJ/kg$$

b) În acest caz volumul gazului este constant ; deci $l_{12} = 0$. Astfel, căldura absorbită serveşte numai la creşterea energiei lui interne, deci :

$$u_2 - u_1 = q_{12} = 500 \ kJ/kg$$

5.2.6. O pompă de apă realizează un debit de $\dot{m} = 1{,}5 \ kg/s$ reuşind să ridice apa de la cota $z_1 = 1 \ m$ la cota $z_2 = 11 \ m$. Presiunea la intrare în pompă este $p_1 = 1{,}2 \ bar$, iar la ieşirea din pompă este $p_2 = 1{,}8 \ bar$. Viteza apei la intrarea în pompă este $w_1 = 0{,}5 \ m/s$, iar cea la ieşire este $w_2 = 1{,}5 \ m/s$. Se cere puterea teoretică consumată de pompă.

Rezolvare :

Aplicând relația (5.31.) putem scrie :

$$q_{1-2} = u_2 - u_1 + v \cdot (p_2 - p_1) + g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \cdot \left(w_2^2 - w_1^2\right) + l_{t_{1-1}} \quad (1)$$

Deoarece pompa nu realizează o creştere de temperatură a apei, iar volumul specific este $v_1 = v_2 = v$, apa fiind incompresibilă, vom avea :

$$u_2 - u_1 = 0$$

$$v = \frac{1}{\rho} = 10^{-3} \ m^3/kg$$

Cotele z_1 şi z_2 definesc înălțimea de pompare a apei :

$$z_2 - z_1 = 11 - 1 = 10 \ m$$

În plus, $q_{1-2} = 0$ deoarece sistemul termodinamic nu primeşte căldură din exterior.

Atunci relația (1) devine :

$$l_{t_{1-2}} = l_p = v \cdot (p_2 - p_1) + g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \cdot (w_2^2 - w_1^2) \qquad (2)$$

l_p fiind lucrul mecanic specific efectuat la pompă (adică lucrul mecanic tehnic specific).

Înlocuind găsim :

$$l_p = (1{,}8 - 1{,}2) \cdot 10^5 \cdot 10^{-3} + \frac{1}{2} \cdot (1{,}5^2 - 0{,}5^2) + 9{,}8 \cdot (11 - 1)$$

$$l_p = 1041 \ J/kg$$

Prin urmare, puterea teoretică pe care o consumă pompa este :

$$P = \dot{m} \cdot l_p = 1{,}5 \cdot 1041 = 1561{,}5 \ W = 1{,}562 \ kW$$

5.2.7. O cantitate de $\nu = 1{,}5 \ kmol$ de azot suferă o transformare de stare, în care temperatura gazului se modifică de la $t_1 = 0^\circ C$ la $t_2 = 50^\circ C$. În ipoteza că valorile căldurilor specifice la presiune constantă şi la volum constant nu variază cu temperatura, să se determine variația energiei interne şi a entalpiei în această transformare.

Rezolvare :

Din anexa 11 se iau valorile masei molare a azotului şi a exponentului adiabatic.

$$M_{N_2} = 28 \ kg/kmol, \ k = 1{,}4$$

Cu ajutorul relației (3.8.) se calculează căldura specifică la volum constant, astfel :

$$c_V = \frac{1}{k-1} \cdot R_{N_2}$$

unde : $R_{N_2} = \dfrac{R_M}{M_{N_2}} = \dfrac{8314{,}3}{28} = 296{,}94 \;\; J/kg \cdot K$

Deci : $$c_V = \frac{1}{1{,}4-1} \cdot 296{,}94 = 742{,}35 \;\; J/kg \cdot K$$

Din relația (3.9.) deducem :

$$c_p = \frac{k}{k-1} \cdot R_{N_2} = \frac{1{,}4}{1{,}4-1} \cdot 296{,}94 = 1039{,}28 \;\; J/kg \cdot K$$

Cu ajutorul tabelului 1.4.17. se determină masa de substanță :

$$m = \nu \cdot M_{N_2} = 1{,}5 \cdot 28 = 42 \;\; kg$$

Cu relația (5.5.) se calculează variația energiei interne ΔU astfel :

$$\Delta U = U_2 - U_1 = m \cdot c_V \cdot \Delta T = 42 \cdot 742{,}35 \cdot (50-0) = 1558{,}935 \;\; kJ$$

Variația entalpiei azotului în această transformare va fi dată de relația (5.14.) :

$$\Delta H = H_2 - H_1 = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 42 \cdot 1039{,}28 \cdot (50-0) = 2182{,}488 \;\; kJ$$

5.2.8. Două rezervoare de gaz izolate adiabatic față de exterior, sunt puse în legătură printr-o conductă de volum neglijabil, prevăzută cu un robinet (fig. 5.1.) care inițial este închis. În primul rezervor se află $m_{O_2} = 4{,}4 \; kg \; O_2$, la $t_{O_2} = 17^\circ C$, iar în cel de al doilea , care are volumul $V_2 = 3 \; m^3$, se află dioxid de carbon la temperatura $t_{CO_2} = 127^\circ C$ și presiunea vacuumetrică $p_V = 0{,}23 \; at$. La deschiderea robinetului se formează un amestec de gaze pentru care se cere să se determine temperatura finală. Se cunoaşte $p_{at} = 1 \; bar$.

Rezolvare :

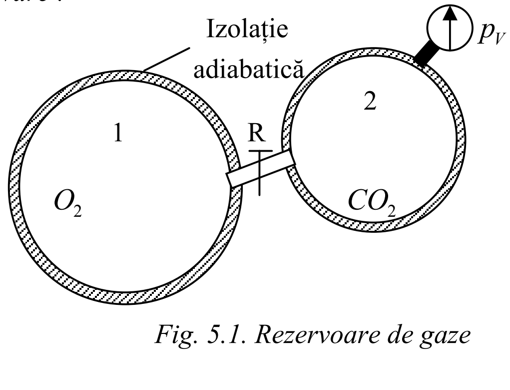


Fig. 5.1. Rezervoare de gaze

Sistemul termodinamic format din cele două rezervoare (care au pereți rigizi) nu poate schimba cu exteriorul căldură – fiind izolat adiabatic şi nici lucru mecanic (nu avem nici un dispozitiv care să facă posibilă o asemenea interacțiune între sistem şi mediu). De asemenea, se observă din figură că sistemul nu poate schimba, masă cu exteriorul ; deci avem un sistem închis şi izolat. Aplicând relația (5.25.) în care :

$\delta Q = 0$ prin ipoteză (izolație adiabatică)

$\delta L = 0$ prin ipoteză (pereți rigizi)

se obține :

$$dU = 0 \text{ sau integrând}$$

$$\Delta U = U_{final} - U_{initial} = 0$$

Ținând cont de faptul că energia internă este mărime aditivă şi aplicând relația (5.5.) obținem :

$$m_{O_2} \cdot c_{V,O_2} \cdot (t_1 - 0) + m_{CO_2} \cdot c_{V,CO_2} \cdot (t_2 - 0) = \left(m_{O_2} \cdot c_{V,O_2} + m_{CO_2} \cdot c_{V,CO_2}\right) \cdot (t - 0)$$

Considerând O_2 şi CO_2 gaze perfecte, aplicând relația (3.9.) şi cu ajutorul anexei 11, găsim :

$$c_{V,O_2} = \frac{R_{O_2}}{k_{O_2} - 1} = \frac{259,82}{1,4 - 1} = 649,55 \ \ J/kg \cdot K$$

$$c_{V,CO_2} = \frac{R_{CO_2}}{k_{CO_2} - 1} = \frac{188,96}{1,3 - 1} = 629,87 \ \ J/kg \cdot K$$

Masa de dioxid de carbon se află din ecuația termică de stare, scrisă pentru condițiile inițiale (înainte de deschiderea robinetului R) :

$$m_{CO_2} = \frac{P_2 \cdot V_2}{R_{CO_2} \cdot T_2} = \frac{(p_{at} - p_V) \cdot V_2}{R_{CO_2} \cdot T_2} = \frac{\left(10^5 - 0,23 \cdot 9,81 \cdot 10^4\right) \cdot 3}{188,96 \cdot 400} = 3,07 \ \ kg$$

Temperatura amestecului va fi :

$$t = \frac{m_{O_2} \cdot c_{V,O_2} \cdot t_{O_2} + m_{CO_2} \cdot c_{V,CO_2} \cdot t_{CO_2}}{m_{O_2} \cdot c_{V,O_2} + m_{CO_2} \cdot c_{V,CO_2}}$$

$$t = \frac{4,4 \cdot 649,75 \cdot 17 + 3,07 \cdot 629,87 \cdot 127}{4,4 \cdot 649,75 + 3,07 \cdot 629,87} = 61,4^{\circ} C$$

5.2.9. Prin comprimare, un kilogram de aer aflat într-un cilindru izolat termic, îşi măreşte temperatura de la $290\ K$ la $400\ K$. Să se determine valoarea lucrului mecanic necesar pentru realizarea comprimării şi variația energiei interne a aerului.

Rezolvare :

Aplicarea relației (5.26.), în condițiile absenței schimbului de căldură $q_{12} = 0$, conduce la determinarea consumului de lucru mecanic pentru comprimare , care, în acest caz, servește la creșterea energiei interne a aerului.

$$u_2 - u_1 = -l_{12}$$

Cu ajutorul relației (5.6.) rezultă :

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \overline{c}_v\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \Delta T$$

unde : $t_1 = 290 - 273 = 17^\circ C$

$$t_2 = 400 - 273 = 127^\circ C$$

Deci, conform relației (3.12.) și anexei 14 rezultă :

$$\overline{c}_v\Big|_{17}^{127} = \frac{\overline{c}_v\Big|_0^{127} \cdot 127 - \overline{c}_v\Big|_0^{17} \cdot 17}{127 - 17} = \frac{0{,}7269 \cdot 127 - 0{,}7175 \cdot 17}{127 - 17} = 0{,}72835 \;\; J/kg \cdot K$$

Deci : $\Delta u = 0{,}72835 \cdot (400 - 290) = 80{,}12 \;\; kJ/kg$

5.3. Probleme propuse

5.3.1. Într-un recipient se află o cantitate de gaz care ocupă volumul de $5\ m^3$, la presiunea de $15\ bar$ și care are entalpia de $H = 8300\ kJ$. Să se determine energia internă a acestei cantități de gaz.

R : $U = 800\ kJ$

5.3.2. O cantitate de $5\ m_N^3$ aer suferă o destindere de la presiunea de $4\ bar$ și temperatura de $60^\circ C$ până la un volum de 3 ori mai mare decât volumul inițial și presiunea de $1\ bar$. Să se determine variația entalpiei aerului în cursul acestor transformări.

R : $\Delta H = -541{,}5\ kJ$

5.3.3. Un gaz efectuează o evoluție din starea 1($p_1 = 1\ bar$; $V_1 = 1\ m^3$) până în starea 2 ($p_2 = 2\ bar$; $V_2 = 0{,}3\ m^3$) ; energia internă a sistemului crește cu valoarea $\Delta U = 28{,}5\ kJ$. Să se determine :

a) variația entalpiei între stările 1 şi 2 ;
b) care trebuie să fie volumul V_2 (ceilalți parametrii rămânând neschimbați) pentru ca variația entalpiei să fie egală cu a energiei interne.

R : a) $\Delta H = -11{,}5\ kJ$

b) $V_2 = 0{,}5\ m^3$

5.3.4. Un gaz efectuează o evoluție în care cedează căldură mediului ambiant şi produce lucru mecanic ; energia internă a sistemului s-a micşorat cu $5124\ J$. Se ştie că, în valoare absolută, mărimea lucrului mecanic este de trei ori mai mică decât schimbul de căldură. Să se determine lucrul mecanic şi căldura schimbată.

R : $L_{12} = 1281\ J$

$Q_{12} = -3843\ J$

5.4 Test grilă

- *Timp de lucru: 15 min.*
- *Fiecare întrebare se punctează cu 1 punct.*

1) Care dintre următoarele grupe de mărimi sunt mărimi de stare măsurabile:
a) *p, V, L;* b) *p, T, Q;* c) *p, T, V;* d) *p, V, U;*
e) *p, V, H;* f) p, T, L_d.

2) Care dintre următoarele grupe de mărimi sunt mărimi de stare:
a) *p, V, Q;* b) *p, V, H;* c) *p, V, U;* d) T, S, L_d;
e) L_d, Q, L_t; f) H, S, L_t.

3) Care dintre următoarele grupe de mărimi sunt mărimi de proces:
a) L, L_d, L_t; b) L, Q, L_t; c) L, Q, L_d; d) *Q, U, S;*
e) *Q, H, L;* f) L, S, L_t.

4) Care dintre următoarele relații sunt corecte:
a) $H = U + pV$; b) $H = U - pV$; c) $U = H - pV$;
d) $dU = mc_p dT$; e) $dH = mc_v dT$; f) $dU = mc_v dT$.

5) Care dintre următoarele relații sunt corecte:
a) $du = \frac{c_p}{k} dT$; b) $dh = c_p dT$; c) $\Delta l_d = \Delta(pv)$;
d) $dl_d = \Delta(pv)$; e) $\Delta h = \frac{k}{k-1} R \Delta T$; f) $\Delta u = \Delta l_d$.

6) Care dintre următoarele relații sunt corecte:
a) $\delta g = mcdT$; b) $\delta Q = mcdT$; c) $Q_{12} = \int_1^2 \delta Q$;
d) $\Delta Q = \int_1^2 \delta Q$; e) $\Delta Q = m \cdot \Delta q$; f) $Q_{12} = mc\Delta T$.

7) Care dintre următoarele relații sunt corecte:
a) $\delta l = m \cdot p \cdot dv$; b) $\delta L = m \cdot p \cdot dv$; c) $\delta L = pdV$;
d) $\Delta L = \int_1^2 \delta L$; e) $L_{12} = ml_{12}$; f) $L_{12} = \int_1^2 pdV$;

8) Care dintre următoarele relații sunt corecte:
a) $\delta l_t = -mpdv$; b) $\delta L_t = mvdp$; c) $\delta L_t = -mvdp$;
d) $\delta L_t = -Vdp$; e) $\Delta L_t = \int_1^2 \delta L_t$; f) $L_{t_{12}} = -\int_1^2 Vdp$.

9) Care dintre următoarele relații sunt adevărate:
a) $\delta Q = dU + pdv$; b) $\delta Q = dU - pdV$ c) $\delta Q = dU - Vdp$; d)
$Q_{12} = \Delta U + L_{12}$; e) $Q_{12} = mc_v \Delta T + \int_1^2 pdV$; f) $q_{12} = \Delta u + l_{12}$.

10) Care dintre următoarele relații sunt adevărate:
a) $\delta Q = dH + \delta L_t$; b) $\delta Q = dH - Vdp$; c) $\delta Q = mc_p dT - Vdp$;
d) $dH = \delta L_t - \delta Q$; e) $\Delta H = Q_{12} - L_{t_{12}}$; f) $Q_{12} = \Delta H + \int_1^2 Vdp$.

CAPITOLUL 6

PROCESE REVERSIBILE DE STARE ALE GAZELOR PERFECTE

6.1. Relații de calcul

Transformarea izobară

- Ecuația transformării :

$$p = ct. \qquad (6.1.)$$

- Reprezentarea grafică :

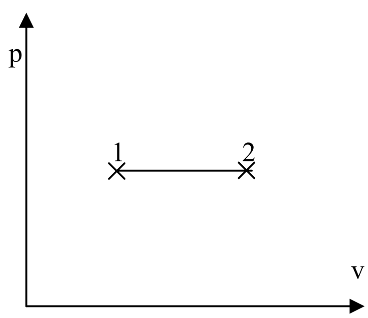


Fig. 6.1. Izobara

- Relații între mărimile de stare :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1} \qquad (6.2.)$$

- Lucrul mecanic schimbat cu exteriorul :

$$L_{1-2} = p_1 \cdot (V_2 - V_1) \qquad (6.3.)$$

- Căldura schimbată cu exteriorul :

$$Q_{1-2} = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \qquad (6.4.)$$

- Lucrul mecanic tehnic schimbat cu exteriorul :

$$L_{t_{1-2}} = 0 \qquad (6.5.)$$

Transformarea izocoră

- Ecuația transformării :

$$V = ct. \qquad (6.6.)$$

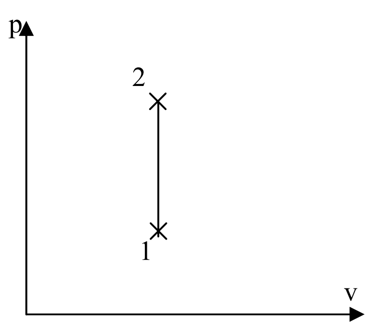


Fig. 6.2. Izocora

- Relații între mărimile de stare :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \qquad (6.7.)$$

- Lucrul mecanic schimbat cu exteriorul :

$$L_{1-2} = 0 \qquad (6.8.)$$

- Căldura schimbată cu exteriorul :

$$Q_{1-2} = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) \qquad (6.9.)$$

- Lucrul mecanic tehnic schimbat cu exteriorul :

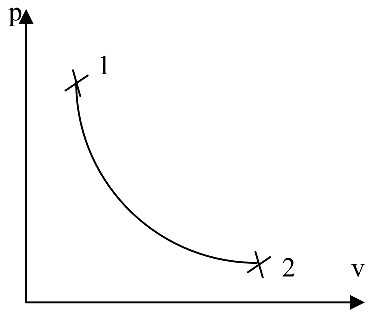
$$L_{t_{1-2}} = V_1 \cdot (p_1 - p_2) \qquad (6.10.)$$

Transformarea izotermă

- Ecuația transformării :

$$pV = ct. \tag{6.11.}$$

- Transformarea grafică :



Fig, 6.3. Izoterma

- Relații între mărimile de stare :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2} \tag{6.12.}$$

- Lucrul mecanic schimbat cu exteriorul :

$$L_{1-2} = p_1V_1 \cdot \ln\frac{V_2}{V_1} \tag{6.13.}$$

$$L_{1-2} = p_1V_1 \cdot \ln\frac{p_1}{p_2} \tag{6.14.}$$

$$L_{1-2} = mRT_1 \cdot \ln\frac{V_2}{V_1} \tag{6.15.}$$

$$L_{1-2} = mRT_1 \cdot \ln\frac{p_1}{p_2} \tag{6.16.}$$

- Căldura schimbată cu exteriorul :

$$Q_{1-2} = L_{1-2} \tag{6.17.}$$

- Lucrul mecanic tehnic schimbat cu exteriorul :

$$L_{t_{1-2}} = Q_{1-2} = L_{1-2} \tag{6.18.}$$

Transformarea adiabată

- Ecuația transformării :

$$pV^k = ct. \tag{6.19.}$$

- Reprezentarea grafică :

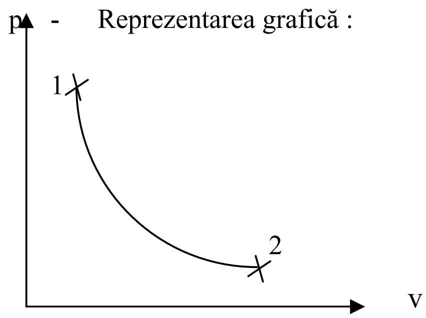


Fig. 6.4. Adiabata

- Relații între mărimile de stare :

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k \tag{6.20.}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \tag{6.21}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \tag{6.22.}$$

- Lucrul mecanic schimbat cu exteriorul :

$$L_{1-2} = \frac{1}{k-1} \cdot \left(p_1 V_1 - p_2 V_2 \right) \qquad (6.23.)$$

$$L_{1-2} = \frac{1}{k-1} \cdot p_1 V_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \qquad (6.24.)$$

- Căldura schimbată cu exteriorul :

$$Q_{1-2} = 0 \qquad (6.25.)$$

- Lucrul mecanic tehnic schimbat cu exteriorul :

$$L_{t_{12}} = \frac{k}{k-1} \cdot \left(p_1 V_1 - p_2 V_2 \right) \qquad (6.26.)$$

$$L_{t_{12}} = \frac{k}{k-1} \cdot p_1 V_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \qquad (6.27.)$$

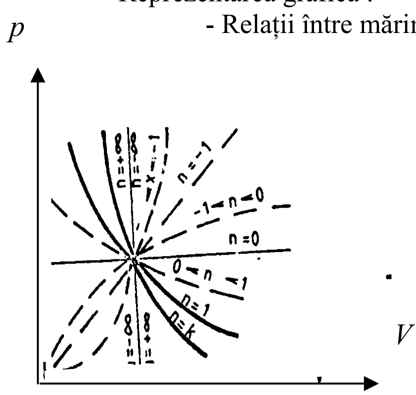
Transformarea politropă :

- Ecuația transformării :

$$pV^n = ct. \qquad (6.28.)$$

- Reprezentarea grafică :

  - Relații între mărimile de stare :



$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n \qquad (6.29.)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \qquad (6.30.)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \qquad (6.31.)$$

Fig. 6.5.Politropa

- Lucrul mecanic schimbat cu exteriorul :

$$L_{1-2} = \frac{1}{n-1} \cdot \left(p_1 V_1 - p_2 V_2 \right) \qquad (6.32.)$$

$$L_{1-2} = \frac{1}{n-1} \cdot p_1 V_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] \qquad (6.33.)$$

- Căldura schimbată cu exteriorul :

$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 + L_{1-2} \qquad (6.34.)$$

$$Q_{1-2} = m \cdot c_n \cdot (T_2 - T_1) \qquad (6.35.)$$

în care :

$$c_n = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \qquad (6.36.)$$

este căldura specifică politropică.

- Lucrul mecanic tehnic schimbat cu exteriorul :

$$L_{t_{12}} = \frac{n}{n-1} \cdot (p_1 V_1 - p_2 V_2) \qquad (6.37.)$$

$$L_{t_{12}} = \frac{n}{n-1} \cdot p_1 V_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] \qquad (6.38.)$$

6.2. Probleme rezolvate

6.2.1. În cilindrul unui compresor se găsesc $210\ g$ de aer la presiunea de $1\ bar$ şi temperatura de $20^\circ C$. Aerul suferă la un moment dat o comprimare izotermă până când volumul scade la $1/4$ din volumul iniţial.

Se cunoaşte că : $R_{aer} = 287\ J/kg \cdot K$. Se cer :

a) mărimile de stare la sfârşitul comprimării ;

b) lucrul mecanic absolut, lucrul mecanic tehnic şi căldura schimbată cu exteriorul.

Rezolvare :

a) Volumul iniţial al aerului, V_1 se determină din ecuaţia termică de stare :

$$V_1 = \frac{m \cdot R_{aer} \cdot T_1}{p_1} = \frac{0{,}21 \cdot 287 \cdot 293{,}15}{10^5} = 0{,}176 \cdot m^3$$

atunci : $V_2 = \frac{1}{4} \cdot V_1 = \frac{0{,}176}{4} = 0{,}044 \ m^3$

Pentru transformarea izotermă avem relația (6.12.) din care rezultă :

$$p_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{V_2} = \frac{10^5 \cdot 0{,}176}{0{,}044} = 4 \cdot 10^5 \ Pa$$

b) $L_{1-2} = \int_1^2 p \cdot dV = mRT_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$ (rel. 6.15.)

adică : $L_{1-2} = 0{,}21 \cdot 287 \cdot 293{,}15 \cdot \ln \frac{0{,}044}{0{,}176} = -24494 \ J$

Conform relației (6.18.) avem :

$$Q_{1-2} = L_{t_{12}} = L_{12} = -24494 \ J$$

6.2.2. În cilindrul unui compresor, având un volum $V_1 = 5 \ l$ se comprimă politropic aer de la starea (1) caracterizată prin parametrii de stare: $p_1 = 1 \ bar$, $t_1 = 20^\circ C$ până la starea (2) caracterizată prin : $p_2 = 3 \ bar$, $T_2 = 373 \ K$.

Se dau : $R_{aer} = 287 \ J/\cdot kg\,K$, $k = 1{,}4$.

Se cer :

a) exponentul politropic al presiunii de comprimare ;

b) lucrul mecanic absolut, lucrul mecanic tehnic şi căldura schimbată cu exteriorul.

Rezolvare :

a) Pornind de la relația (6.31.), prin logaritmare găsim :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow \frac{n-1}{n} = \frac{\ln(T_2/T_1)}{\ln(p_2/p_1)} = \frac{\ln(373/290)}{\ln(3/1)}$$

de unde rezultă : $n = 1{,}3$.

Masa aerului este : $m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 5}{287 \cdot 290} = 6 \cdot 10^{-3} \ kg$

b) Lucrul mecanic absolut în procesul de comprimare este :

$$L_{1-2} = \frac{mRT_1}{n-1} \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$L_{1-2} = \frac{6 \cdot 10^{-3} \cdot 287 \cdot 290}{1{,}3 - 1} \cdot \left(1 - \frac{373}{290}\right) = -480 \ J$$

Lucrul mecanic tehnic este :

$$L_{t_{1-2}} = n \cdot L_{1-2} = -480 \cdot 1{,}3 = -624 \ J$$

Căldura specifică politropică este :

$$c_n = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} = \frac{R}{k-1} \cdot \frac{n-k}{n-1} = \frac{287}{1{,}4-1} \cdot \frac{1{,}3-1{,}4}{1{,}3-1} = -239 \ J/kg \cdot K$$

Căldura schimbată cu exteriorul este :

$$Q_{1-2} = m \cdot c_n \cdot (T_2 - T_1) = 6 \cdot 10^{-3} \cdot (-239) \cdot (373 - 290) = -120 \ J$$

6.2.3. O cantitate de dioxid de carbon se găseşte în starea inițială la presiunea $p_1 = 15 \ bar$, temperatura $t_1 = 527^\circ C$ şi ocupă volumul $V_1 = 250 \ dm^3$. Pornind de fiecare dată din această stare, gazul evoluează efectuând următoarele transformări :

- **o izobară, o izotermă, o adiabată şi o politropă cu $n = 1{,}5$ până când volumul se dublează ;**
- **o izocoră până când presiunea scade la jumătate.**

Se cer următoarele :

a) Mărimile termice de stare în punctele finale ale transformărilor ;

b) Lucrul mecanic absolut şi lucrul mecanic tehnic schimbate cu exteriorul pe fiecare transformare ;

c) Să se reprezinte fiecare transformare într-o diagramă $p - V$ şi să se ilustreze grafic lucrul mecanic absolut, respectiv tehnic pentru fiecare transformare.

Pentru dioxidul de carbon $k = 1{,}3$.

Rezolvare :

a) Se efectuează reprezentarea grafică a celor cinci transformări, aşa cum se vede în fig. 6.6. :

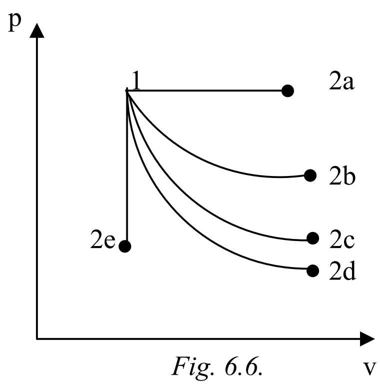


Fig. 6.6.

- pentru transformarea 1 – 2a, care este izobară, se cunosc :

$$1\begin{cases} p_1 = 15\ bar = 15\cdot 10^5\ Pa \\ V_1 = 0{,}25\ m^3 \\ T_1 = 800\ K \end{cases} \qquad 2a\begin{cases} p_{2a} = p_1 = 15\ bar = 15\cdot 10^5\ Pa \\ V_{2a} = 2\cdot V_1 = 0{,}5\ m^3 \end{cases}$$

Cu ajutorul relației (6.2.) se determină temperatura T_{2a}.

Deci : $$\frac{T_{2a}}{T_1} = \frac{V_{2a}}{V_1} \Rightarrow T_{2a} = T_1\cdot\frac{V_{2a}}{V_1} = 800\cdot 2 = 1600\ K$$

- Transformarea 1 – 2b este o izotermă pentru care se cunosc :

$$\begin{cases} T_{2b} = T_1 = 800\ K \\ V_{2b} = 2\cdot V_1 = 0{,}5\ m^3 \end{cases}$$

Aplicând relația (6.11.), rezultă :

$$p_1\cdot V_1 = p_{2b}\cdot V_{2b} \Rightarrow p_{2b} = p_1\cdot\frac{V_1}{V_{2b}} = 15\cdot\frac{1}{2} = 7{,}5\ bar$$

- Transformarea 1 – 2c este o adiabată pentru care se cunoaşte :

$$V_{2c} = 2\cdot V_1 = 0{,}5\ m^3$$

Presiunea p_{2c} se determină cu ajutorul relației (6.20.) :

$$\frac{p_{2c}}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_{2c}}\right)^k \Rightarrow p_{2c} = p_1\cdot\left(\frac{V_1}{V_{2c}}\right)^k = 15\cdot\left(\frac{1}{2}\right)^{1,3} = 6{,}1\ bar$$

Temperatura T_{2c} se determină cu ajutorul relației (6.21.) :

$$\frac{T_{2c}}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_{2c}}\right)^{k-1} \Rightarrow T_{2c} = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{2c}}\right)^{k-1} = 800 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{0,3} = 650\ K$$

- Transformarea 1 – 2d este o politropă pentru care se cunoaşte :

$$V_{2d} = 2 \cdot V_1 = 0,5\ m^3$$

Presiunea p_{2d} se determină cu ajutorul relației (6.29.) :

$$\frac{p_{2d}}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_{2d}}\right)^{n} \Rightarrow p_{2d} = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{2d}}\right)^{n} = 15 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{1,5} = 5,3\ bar$$

Temperatura T_{2d} se determină cu ajutorul relației (6.30.) :

$$\frac{T_{2d}}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_{2d}}\right)^{n-1} \Rightarrow T_{2d} = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{2d}}\right)^{n-1} = 800 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{0,5} = 565,6\ K$$

- Transformarea 1 – 2e este o izocoră pentru care se cunosc :

$$\begin{cases} p_{2e} = \dfrac{p_1}{2} = 7,5\ bar \\ V_{2e} = V_1 = 0,25\ m^3 \end{cases}$$

Temperatura T_{2e} se va calcula cu relația (6.7.) :

$$\frac{T_{2e}}{T_1} = \frac{p_{2e}}{p_1} \Rightarrow T_{2e} = T_1 \cdot \frac{p_{2e}}{p_1} = 800 \cdot \frac{1}{2} = 400\ K$$

b)

- Pentru calculul lucrului mecanic absolut pe transformarea izobară 1 – 2a se aplică relația (6.3.) :

$$L_{1-2a} = p_1 \cdot (V_{2a} - V_1) = 15 \cdot 10^5 \cdot (0,5 - 0,25) = 375\ kJ$$

Conform relației (6.5.) , lucrul mecanic tehnic este :

$$L_{t_{1-2a}} = 0$$

- Aplicând relațiile (6.13.) şi (6.18.) se determină pentru izotermă :

$$L_{1-2b} = p_1 V_1 \cdot \ln\frac{V_{2b}}{V_1} = 15 \cdot 10^5 \cdot 0,25 \cdot \ln 2 = 259,93\ kJ$$

$$L_{t_{1-2b}} = L_{1-2b} = 259,93\ kJ$$

- Pentru transformarea adiabată se aplică relațiile (6.23.) şi (6.26.). Deci :

$$L_{1-2c} = \frac{1}{k-1} \cdot (p_1 V_1 - p_{2c} V_{2c}) = \frac{1}{1,3-1} \cdot \left(15 \cdot 10^5 \cdot 0,25 - 6,1 \cdot 0,5 \cdot 10^5\right) = 233,33\ kJ$$

$$L_{t_{1-2c}} = \frac{k}{k-1}\cdot\left(p_1V_1 - p_{2c}V_{2c}\right) = \frac{1,3}{1,3-1}\cdot\left(15\cdot10^5\cdot0,25 - 6,1\cdot10^5\cdot0,5\right) = 303,33\ kJ$$

- Pentru transformarea politropă se aplică relațiile (6.32.) şi (6.37.). Rezultă :

$$L_{1-2d} = \frac{1}{n-1}\cdot\left(p_1V_1 - p_{2d}V_{2d}\right) = \frac{1}{1,5-1}\cdot\left(15\cdot10^5\cdot0,25 - 5,3\cdot10^5\cdot0,5\right) = 220\ kJ$$

$$L_{t_{1-2d}} = \frac{n}{n-1}\cdot\left(p_1V_1 - p_{2d}V_{2d}\right) = \frac{1,5}{1,5-1}\cdot\left(15\cdot10^5\cdot0,25 - 5,3\cdot10^5\cdot0,5\right) = 330\ kJ$$

- Pentru transformarea izocoră se aplică relațiile (6.8.) şi (6.10.). Astfel :

$$L_{1-2e} = 0$$

$$L_{t_{1-2e}} = V_1\cdot\left(p_1 - p_{2e}\right) = 0,25\cdot\left(15\cdot10^5 - 7,5\cdot10^5\right) = 187,5\ kJ$$

c) În fig. 6.7. sunt reprezentate lucrul mecanic absolut şi lucrul mecanic tehnic pentru fiecare transformare :

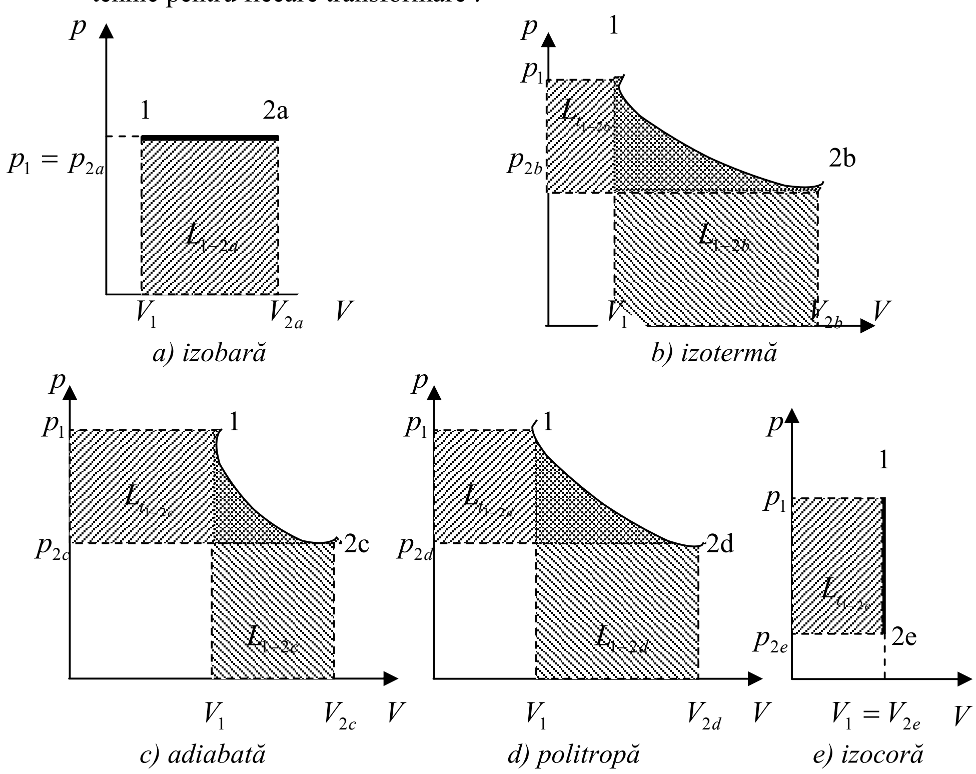


Fig. 6.7.

6.2.4. Un amestec de gaze este format din dioxid de carbon şi azot cu participațiile masice : $r_{CO_2} = 0{,}2$ **şi** $r_{N_2} = 0{,}8$**. În starea inițială amestecul are presiunea** $p_1 = 2{,}5\ bar$**, temperatura** $t_1 = 27^\circ C$ **şi ocupă volumul** $V_1 = 6{,}7\ dm^3$**. Din această stare, amestecul este supus următoarelor transformări succesive :**

- **o izocoră până la temperatura** $t_2 = 300^\circ C$ **;**
- **o adiabată până la valoarea presiunii inițiale .**

Să se determine :

a) Mărimile termice de stare în punctele inițiale şi finale ale fiecărei transformări şi să se reprezinte transformările în aceeaşi diagramă $p-V$ **;**

b) Schimbul de lucru mecanic şi de căldură cu exteriorul pe fiecare transformare.

c) Să se reprezinte izoterma prin punctul final al adiabatei.

Se consideră căldurile specifice masice constante cu temperatura.

Rezolvare :

a) În fig. 6.8. s-a efectuat reprezentarea de principiu a celor două transformări în diagrama $p-V$.

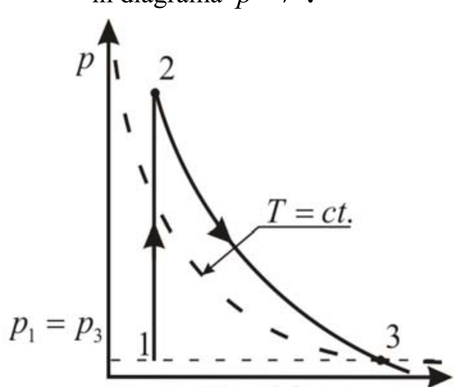


Fig. 6.8

Tabel 6.1.

Starea	p $[bar]$	V $[m^3]$	T $[K]$
1	2,5	$6{,}7\cdot10^{-3}$	300
2	4,77	$6{,}7\cdot10^{-3}$	573
3	2,5	$10{,}73\cdot10^{-3}$	481,4

Se întocmeşte tabelul 6.1. în care se vor înscrie mărimile termice de stare date în enunț şi cele calculate. Se calculează masa molară aparentă a amestecului de gaze cu ajutorul relației (4.12.) şi cu anexa 11, astfel :

$$M_{am} = \sum_{i=1}^{2} r_i \cdot M_i = r_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + r_{N_2} \cdot M_{N_2} = 0{,}2 \cdot 44 + 0{,}8 \cdot 28 = 31{,}2 \ kg/kmol$$

Constanta amestecului de gaze va fi :

$$R_{am} = \frac{R_M}{M_{am}} = \frac{8314{,}3}{31{,}2} = 266{,}48 \ J/kg \cdot K$$

- Transformarea 1 – 2 este izocoră, deci $V_2 = V_1$.

  Presiunea p_2 se determină cu relația (6.7.) :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \Rightarrow p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 2{,}5 \cdot \frac{573}{300} = 4{,}77 \ bar$$

- Transformarea 2 – 3 este o adiabată. Se știe că $p_3 = p_1$. Volumul se determină cu relația (6.20.) :

$$\frac{p_3}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_3} \right)^k$$

unde exponentul adiabatic k se calculează astfel :

$$k = \frac{c_{p,am}}{c_{v,am}}$$

Din relația (4.16.) rezultă :

$$c_{p,am} = \sum_{i=1}^{2} g_i \cdot c_{pi} = g_{CO_2} \cdot c_{p,CO_2} + g_{N_2} \cdot c_{p,N_2}$$

Participațiile masice se determină cu relația (4.15.) :

$$g_i = r_i \cdot \frac{M_i}{\sum_{i=1}^{2} r_i \cdot M_i}$$

Deci :

$$g_{CO_2} = \frac{0{,}2 \cdot 44}{31{,}2} = 0{,}282$$

$$g_{N_2} = \frac{0{,}8 \cdot 28}{31{,}2} = 0{,}718$$

Căldurile specifice masice la presiune constantă se calculează cu relația (3.9.) și anexa 11. Deci :

$$c_{p,CO_2} = \frac{k_{CO_2}}{k_{CO_2} - 1} \cdot R_{CO_2} = \frac{1{,}31}{1{,}31 - 1} \cdot 188{,}778 = 797{,}7 \ J/kg \cdot K$$

.

$$c_{p,N_2} = \frac{k_{N_2}}{k_{N_2} - 1} \cdot R_{N_2} = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 296,749 = 1038,62 \;\; J/kg \cdot K$$

Cu aceste valori calculăm căldura specifică masică la presiune constantă a amestecului :

$$c_{p,am} = 0,282 \cdot 797,7 + 0,718 \cdot 1038,62 = 970,68 \;\; J/kg \cdot K$$

Căldura specifică masică la volum constant se calculează cu ajutorul relației (3.7.) :

$$c_{p,am} - c_{v,am} = R_{am}$$

De unde : $c_{v,am} = c_{p,am} - R_{am} = 970,68 - 266,48 = 704,2 \;\; J/kg \cdot K$

Se obține astfel exponentul adiabatic al amestecului :

$$k = \frac{970,68}{704,2} = 1,37$$

Volumul ocupat de gaz în starea 3 este :

$$V_3 = V_2 \cdot \left(\frac{p_2}{p_3}\right)^{\frac{1}{k}} = 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{4,77}{2,5}\right)^{\frac{1}{1,37}} = 0,01073 = 10,73 \cdot 10^{-3} \;\; m^3$$

Pentru a afla temperatura în starea 3 se aplică relația (6.21.) :

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{k-1} \Rightarrow T_3 = T_2 \cdot \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{k-1} = 573 \cdot \left(\frac{6,7}{10,73}\right)^{1,37-1} = 481,4 \;\; K$$

b) Transformarea 1 – 2 fiind izocoră se deduce :

$$L_{1-2} = 0$$

Conform relației (6.9.), pentru izocoră căldura primită este :

$$Q_{1-2} = m \cdot c_v \cdot \Delta T = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

Aplicând ecuația termică în starea inițială se determină masa de amestec :

$$m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_{am} \cdot T_1} = \frac{2,5 \cdot 10^5 \cdot 6,7 \cdot 10^{-3}}{266,48 \cdot 300} = 20,952 \cdot 10^{-3} \;\; kg$$

Deci :

$$Q_{1-2} = 20,952 \cdot 10^{-3} \cdot 704,2 \cdot (573 - 300) = 4027,95 \;\; J$$

Pentru transformarea adiabată, lucrul mecanic absolut se determină cu relația (6.24.) :

$$L_{23} = \frac{1}{k-1} \cdot p_2 \cdot V_2 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{1}{1,37-1} \cdot 4,77 \cdot 10^5 \cdot 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot$$

$$\cdot \left[1 - \left(\frac{2,5}{4,77} \right)^{\frac{1,37-1}{1,37}} \right] = 1382,95 \ J$$

$Q_{1-2} = 0$ conform relației (6.2.8.).

c) Se ține seama că izoterma are exponentul $n = 1$ şi se reprezintă transformarea în fig. 6.2.3., în raport cu adiabata care are $n = k = 1,37$.

6.2.5. O cantitate de azot ocupă un volum $V_1 = 1 \ m^3$ la presiunea $p_1 = 1 \ bar$ şi temperatura $t_1 = 30^\circ C$ şi efectuează un proces politrop în cursul căruia exponentul politropic poate avea valoarea :
a) $n = 1$; b) $n = k$; c) $n = \pm\infty$; d) $n = 1,1$; e) $n = 2$; f) $n = -1$; g) $n = 0$.

În cazul transformărilor a … f presiunea în stare finală este $p_2 = 5 \ bar$, iar în cazul transformării g, volumul în starea finală $V_g = 3 \ m^3$.

Se cere :

a) Să se reprezinte procesele în diagrama $p - V$ şi să se calculeze mărimile termice de stare în starea finală a fiecărui proces ;
b) Variația energiei interne ΔU şi entalpia ΔH în cursul fiecărui proces;
c) Să se calculeze căldura, lucrul mecanic absolut şi lucrul mecanic tehnic schimbate de azot cu exteriorul , în timpul fiecărui proces.

Rezolvare :

a) În fig. 6.9. sunt reprezentate procesele în diagrama $p - V$:

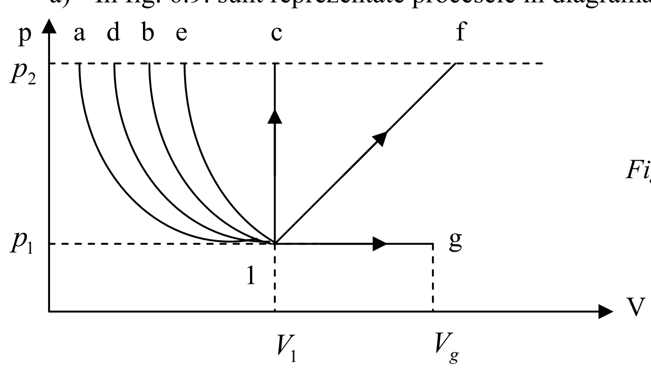


Fig. 6.9.

Relațiile dintre mărimile termice de stare pentru un proces politrop sunt :

$p \cdot V^n = ct.$; $T \cdot V^{n-1} = ct.$; $\frac{p^{\frac{n-1}{n}}}{T} = ct.$

Prin urmare, mărimile termice de stare se calculează după cum urmează :

- Transformarea 1 – a : $n = 1$; $p \cdot V = ct.$; $T_a = T_1 = ct.$ (izotermă); $p_a = 5\ bar$.

$$p_1 \cdot V_1 = p_a \cdot V_a \Rightarrow V_a = V_1 \cdot \frac{p_1}{p_a} = 1 \cdot \frac{1}{5} = 0{,}2\ m^3$$

- Transformarea 1 – b : $n = k$, $k = 1{,}4$ (anexa 11).

$$p_1 \cdot V_1^k = p_b \cdot V_b^k \text{ (adiabată)}$$

$$V_b = V_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_b}\right)^{\frac{1}{k}} = 1 \cdot \left(\frac{1}{5}\right)^{\frac{1}{1{,}4}} = 0{,}3167\ m^3$$

Din relația (6.22) rezultă temperatura :

$$T_b = T_1 \cdot \left(\frac{p_b}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 303{,}15 \cdot 5^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} = 480{,}13\ K$$

- Transformarea 1 – c : $n = \pm\infty$; $\frac{p}{V} = ct.$; $V = ct.$ (izocoră). Deci $V_c = V_1 = 1\ m^3$.

Aplicând relația (6.7.) obținem temperatura T_c :

$$\frac{p_c}{p_1} = \frac{T_c}{T_1} \Rightarrow T_c = T_1 \cdot \frac{p_c}{p_1} = 303{,}15 \cdot \frac{5}{1} = 1515{,}75\ K$$

- Transformarea 1 – d : $n = 1{,}1$. Din relația (6.29.) rezultă :

$$V_d = V_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_d}\right)^{\frac{1}{n}} = 1 \cdot \frac{1}{5^{\frac{1}{1{,}1}}} = 0{,}231\ m^3$$

Din relația (6.31.) rezultă :

$$T_d = T_1 \cdot \left(\frac{p_d}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 303{,}15 \cdot 5^{\frac{1{,}1-1}{1{,}1}} = 350{,}9\ K$$

- Transformarea 1 – e : $n = 2$. Utilizând relațiile (6.29.) și (6.31.) obținem :

.

$$V_e = V_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_e}\right)^{\frac{1}{n}} = 1 \cdot \frac{1}{5^{\frac{1}{2}}} = 0{,}447\ m^3$$

$$T_e = T_1 \cdot \left(\frac{p_e}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 303{,}15 \cdot \left(\frac{5}{1}\right)^{\frac{2-1}{2}} = 677{,}8\ K$$

- Transformarea 1 – f : $n = -1$. Procedând analog rezultă :

$$V_f = V_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_f}\right)^{\frac{1}{n}} = 1 \cdot 5 = 5\ m^3$$

$$T_f = T_1 \cdot \left(\frac{p_f}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 303{,}15 \cdot 5^2 = 7578{,}75\ K$$

- Transformarea 1 – g : $n = 0$; $p \cdot V^n = ct.$; $p = ct.$ (izobară). Deci :

$$p_1 = p_g = 1 \cdot bar$$

$$V_g = 3 \cdot m^3$$

Din relația (6.2.) deducem :

$$\frac{T_g}{T_1} = \frac{V_g}{V_1} \Rightarrow T_g = T_1 \cdot \frac{V_g}{V_1} = 303{,}15 \cdot \frac{3}{1} = 909{,}45\ K$$

Mărimile termice de stare sunt centralizate în tabelul 6.2. :

Tabelul 6.2.

Starea	$p\ [bar]$	$V\ [m^3]$	$T\ [K]$
a	5	0,2	303,15
b	5	0,3167	480,13
c	5	1	1515,75
d	5	0,231	350,9
e	5	0,447	677,8
f	5	5	7578,75
g	1	3	909,45

b) Pentru calculul variației energiei interne ΔU se aplică relația (5.5.) şi se ia valoarea lui k din anexa 11 :

$$\Delta U = m \cdot c_V \cdot \Delta T = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_{N_2} \cdot T_1} \cdot \frac{R_{N_2}}{k-1} \cdot \Delta T = \frac{10^5 \cdot 1}{(1{,}4-1) \cdot 303{,}15} \cdot \Delta T = 824{,}67 \cdot \Delta T$$

$$U_a - U_1 = 824{,}67 \cdot (303{,}15 - 303{,}15) = 0$$

$$U_b - U_1 = 824{,}67 \cdot (480{,}15 - 303{,}15) = 145{,}9 \ kJ$$

$$U_c - U_1 = 824{,}67 \cdot (1515{,}75 - 303{,}15) = 1000 \ kJ$$

$$U_d - U_1 = 824{,}67 \cdot (350{,}9 - 303{,}15) = 39{,}4 \ kJ$$

$$U_e - U_1 = 824{,}67 \cdot (677{,}8 - 303{,}15) = 308{,}9 \ kJ$$

$$U_f - U_1 = 824{,}67 \cdot (7578{,}75 - 303{,}15) = 6000 \ kJ$$

$$U_g - U_1 = 824{,}67 \cdot (909{,}45 - 303{,}15) = 500 \ kJ$$

Pentru calculul variației entalpiei ΔH se aplică relația (5.14.), iar valoarea lui k se ia din anexa 11 :

$$\Delta H = m \cdot c_p \cdot \Delta T = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_{N_2} \cdot T_1} \cdot \frac{k \cdot R_{N_2}}{k-1} \cdot \Delta T = 1154{,}5 \cdot \Delta T$$

$$H_a - H_1 = 0$$

$$H_b - H_1 = 204{,}26 \ kJ$$

$$H_c - H_1 = 1400 \ kJ$$

$$H_d - H_1 = 55{,}16 \ kJ$$

$$H_e - H_1 = 432{,}46 \ kJ$$

$$H_f - H_1 = 8400 \ kJ$$

$$H_g - H_1 = 700 \ kJ$$

c) Pentru calculul căldurii, lucrului mecanic absolut L şi lucrului mecanic tehnic L_t în cazul procesului politropic se aplică relațiile (6.35.), (6.33.) şi (6.38.).

- Transformarea 1 – a : $n = 1$; $p \cdot V = ct.$; $T_1 = T_a = ct.$ (izotermă).

$$Q_{1-a} = L_{1-a} = L_{t_{1-a}} = mRT_1 \cdot \ln\frac{p_1}{p_a} = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln\frac{p_1}{p_a} = 10^5 \cdot 1 \cdot \ln\frac{1}{5} = -161 \ kJ$$

- Transformarea 1 – b : $n = k$ (adiabată).

$$Q_{1-b} = 0$$

$$L_{1-b} = \frac{1}{k-1} \cdot p_1 \cdot V_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_b}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] = \frac{1}{1{,}4-1} \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot \left[1 - 5^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}\right] = -145{,}954 \ kJ$$

$$L_{t_{1-b}} = k \cdot L_{1-b} = -204{,}34 \ kJ$$

- Transformarea 1 – c : $n = \pm\infty$; $V = ct.$ (izocoră).

$$Q_{1-c} = m \cdot c_v \cdot (T_c - T_1) = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_{N_2} \cdot T_1} \cdot \frac{R_{N_2}}{k-1} \cdot (T_c - T_1) = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1 \cdot (k-1)} \cdot (T_c - T_1) =$$

$$= \frac{10^5 \cdot 1}{303{,}15 \cdot (1{,}4-1)} \cdot (1515{,}75 - 303{,}15) = 10^3 \ kJ$$

$$L_{1-c} = 0$$

$$L_{t_{1-c}} = V_1 \cdot (p_1 - p_c) = 1 \cdot \left(10^5 - 5 \cdot 10^5\right) = -4 \cdot 10^5 \ J = -400 \ kJ$$

- Transformarea 1 – d : $n = 1{,}1$.

$$Q_{1-d} = m \cdot c_n \cdot (T_d - T_1) = m \cdot c_V \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_d - T_1) = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_{N_2} \cdot T_1} \cdot \frac{R_{N_2}}{k-1} \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_d - T_1) =$$

$$= \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} \cdot \frac{1}{k-1} \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_d - T_1) = \frac{10^5 \cdot 1}{303{,}15} \cdot \frac{1}{1{,}4-1} \cdot \frac{1{,}1-1{,}4}{1{,}1-1} \cdot (350{,}9 - 303{,}15) =$$

$$= -118{,}13 \ kJ$$

$$L_{1-d} = \frac{p_1 \cdot V_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_d}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] = \frac{10^5 \cdot 1}{1{,}1-1} \cdot \left[1 - 5^{\frac{1{,}1-1}{1{,}1}}\right] = -157{,}6 \ kJ$$

$$L_{t_{1-d}} = n \cdot L_{1-d} = -1{,}1 \cdot 157{,}6 = -173{,}31 \ kJ$$

- Transformarea 1 – e : $n = 2$.

$$Q_{1-e} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} \cdot \frac{1}{k-1} \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_e - T_1) = \frac{10^5 \cdot 1}{303{,}15} \cdot \frac{1}{1{,}4-1} \cdot \frac{2-1{,}4}{2-1} \cdot (677{,}8 - 303{,}15) =$$

$$= 185{,}4 \ kJ$$

$$L_{1-e} = \frac{p_1 \cdot V_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] = \frac{10^5 \cdot 1}{2-1} \cdot \left[1 - 5^{\frac{2-1}{2}}\right] = -123{,}6 \ kJ$$

$$L_{t_{1-e}} = n \cdot L_{1-e} = -2 \cdot 123{,}6 = -247{,}2 \ kJ$$

.

- Transformarea 1 – f : $n = -1$.

$$Q_{1-f} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} \cdot \frac{1}{k-1} \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \left(T_f - T_1\right) = \frac{10^5 \cdot 1}{303{,}15} \cdot \frac{1}{1{,}4-1} \cdot \frac{-1-1{,}4}{-1-1} \cdot$$

$$\cdot \left(7578{,}75 - 303{,}15\right) = 7200 \ kJ$$

$$L_{1-f} = \frac{p_1 \cdot V_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_f}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] = \frac{10^5 \cdot 1}{-1-1} \cdot \left[1 - 5^{\frac{-1-1}{-1}}\right] = 1200 \ kJ$$

$$L_{t_{1-f}} = n \cdot L_{1-f} = -1200 \ kJ$$

- Transformarea 1 – g : $n = 0$; $p = ct.$ (izobară).

$$Q_{1-g} = m \cdot c_p \cdot \left(T_g - T_1\right) = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_{N_2} \cdot T_1} \cdot \frac{k \cdot R_{N_2}}{k-1} \cdot \left(T_g - T_1\right) = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left(T_g - T_1\right) =$$

$$= \frac{10^5 \cdot 1}{303{,}15} \cdot \frac{1{,}4}{1{,}4-1} \cdot \left(909{,}45 - 303{,}15\right) = 700 \ kJ$$

$$L_{1-g} = p_1 \cdot \left(V_g - V_1\right) = 10^5 \cdot \left(3-1\right) = 200 \ kJ$$

$$L_{t_{1-g}} = 0$$

Rezultatele calculelor efectuate la punctele b) şi c) sunt centralizate în tabelul 6.3.

Tabelul 6.3.

Transformarea	**Variaţia mărimilor de stare**		**Calculul schimburilor energetice**		
	$\Delta U \ [kJ]$	$\Delta H \ [kJ]$	$Q_{1-i} [kJ]$	$L_{1-i} [kJ]$	$L_{t_{1-i}} [kJ]$
1 – a	0	0	-161	-161	-161
1 – b	145,9	204,26	0	-145,9	-204,34
1 – c	1000	1400	1000	0	-400
1 – d	39,4	55,16	-118,13	-157,6	-173,31
1 – e	308,9	432,46	185,4	-123,6	-247,2
1 – f	6000	8400	7200	1200	-1200
1 – g	500	700	700	200	0

Se acceptă erori de calcul până la 1%.

6.2.6. O cantitate de CO2 aflată iniţial la presiunea p_1 = 2 bar efectuează procesul redat în figura 6.10.

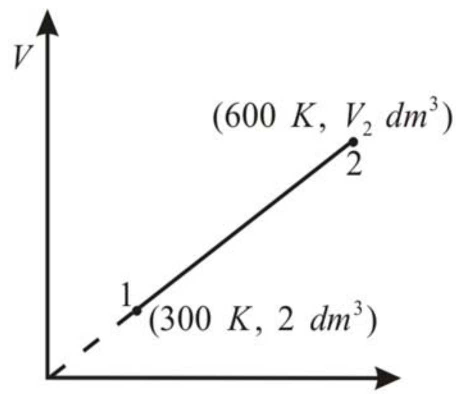


Fig. 6.10

a) Să se precizeze natura procesului. Justificare;

b) Parametrii de stare măsurabili în fiecare stare;

c) Variațiile mărimilor de stare (analitice);

d) Schimbările energetice cu exteriorul.
Se vor considera căldurile specifice constante cu temperatura.

Rezolvare:

a) Prelucrând convenabil ecuația de stare a gazelor perfecte: pV = mRT şi ținând seama că graficul din fig. 6.10 reprezintă o dreaptă ce trece prin originea axelor, (adică are ecuația: V = αT, α = constant), obținem:

$$V = \frac{mR}{p} \cdot T$$

Prin urmare $\frac{mR}{p} = \alpha$ = constant $\Leftrightarrow$ p = $\underline{\underline{ct}}$

Deci, 1-2 este un proces izobar.

b) Parametrii de stare măsurabili în cele două stări sunt prezentați sintetic în tab. 6.4.

Tab. 6.4

Starea	p[bar]	V[dm^3]	T[K]
1	2	2	300
2	2	4	600

unde V_2 s-a determinat cu relația 6.2.

$$V_2 = \frac{T_2}{T_1} \cdot V_1 = \frac{600}{300} \cdot 2 = 4 \ dm^3$$

c) Variațiile mărimilor de stare (analitice) între stările 1 şi 2 sunt:

$$\Delta U = m \cdot c_v \cdot \Delta T = m\frac{R}{k-1} \cdot (T_2 - T_1) =$$

$$= \frac{1}{k-1}(mRT_2 - mRT_1) = \frac{1}{k-1}(p_1V_2 - p_1V_1) =$$

$$= \frac{p_1}{k-1}(V_2 - V_1) = \frac{p_1 \Delta V}{k-1}$$

$$\Delta U = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{1{,}31 - 1} = 1290{,}3 \ J$$

(k = 1,31 extras din anexa 11)

$$\Delta H = k\Delta U = 1{,}31 \cdot 1290{,}3 = 1690{,}3 \ J$$

$$\Delta L_d = p_1 \Delta V = \frac{\Delta U}{k-1} = \frac{1290{,}3}{0{,}31} = 4162{,}3 \ J$$

d) Pentru calculul schimbărilor energetice se determină mai întâi masa gazului care efectuează procesul:

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{188{,}778 \cdot 300} = 7{,}1 \cdot 10^{-3} \ kg$$

unde pentru CO_2, din anexa 11 s-a extras *R = 188,778 J/kgK.*
Se obține:

$$Q_{12} = m \cdot c_p \cdot \Delta T = \Delta H = 1690{,}3 \ J$$

$$L_{12} = p_1 \cdot \Delta V = \Delta L_d = 4162{,}3 \ J$$

$$L_{t_{12}} = 0.$$

6.2.7 Un kg de NO efectuează procesul redat în fig. 6.11. Se cer:

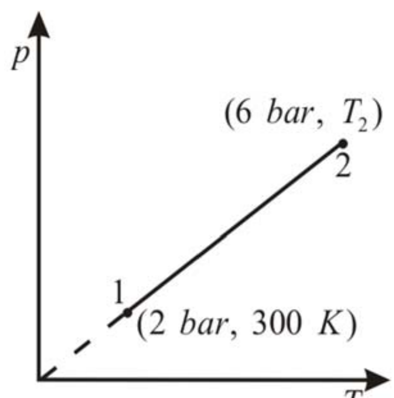


Fig. 6.11

a) Să se precizeze natura procesului. Justificare;

b) Parametrii de stare măsurabili în fiecare stare;

c) Variațiile mărimilor de stare (analitice);

d) Schimburile energetice cu exteriorul.

Se vor considera căldurile specifice constante cu temperatura.

Rezolvare:

a) Pentru a preciza natura procesului se au în vedere:
- ecuația de stare a gazului: pV = RT; (1)
- ecuația dreptei care trece prin origine: p = αT, unde α = constant (vezi fig. 6.11)

Prelucrând convenabil ecuația (1) se obține:

$$p = \frac{R}{v}T$$

Prin urmare: $\frac{R}{v} = \alpha = constant \Leftrightarrow$ v = *constant*.

Deci, 1-2 este un proces izocor

b) Parametrii de stare măsurabili în cele două stări sunt precizați sintetic în tab. 6.5.

Tab. 6.5

Starea	p [bar]	V[dm^3/kg]	T[K]
1	2	416	300
2	6	416	900

Volumul în starea 1 este:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{277{,}136 \cdot 300}{2 \cdot 10^5} = 0{,}416 \frac{m^3}{kg} = v_2 = v$$

unde pentru NO, din anexa 11 s-a extras R = 277,136 J/kgK

Temperatura T_2 se obține aplicând relația:

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} \cdot T_1 = \frac{6}{2} \cdot 300 = 900\ K$$

c) Variațiile mărimilor de stare (analitice) între stările 1 și 2 sunt:

$$\Delta u = c_v \cdot \Delta T = \frac{R}{k-1}(T_2 - T_1) = \frac{1}{k-1}(RT_2 - RT_1) =$$

$$= \frac{1}{k-1}(p_2 v - p_1 v) = \frac{v}{k-1} \cdot \Delta p$$

$$\Delta u = \frac{0{,}416}{1{,}4-1} \cdot 4 \cdot 10^5 = 416 \cdot 10^3\ J/kg$$

(k = 1,4 extras din anexa 11)

$$\Delta h = k\Delta u = 1{,}4 \cdot 416 \cdot 10^3 = 582{,}4 \cdot 10^3\ J/kg$$

$$\Delta l_d = p_2 v - p_1 v = v \cdot \Delta p = \frac{\Delta u}{k-1} = \frac{416 \cdot 10^3}{1{,}4-1} = 1040 \cdot 10^3\ J/kg$$

d) Schimbările energetice cu exteriorul sunt:

$$q_{12} = c_v \cdot \Delta T = \Delta u = 416 \cdot 10^3\ J/kg$$

$$l_{12} = 0$$

$$l_{t_{12}} = -v\Delta p = -\Delta l_d = -582{,}4 \cdot 10^3\ J/kg$$

6.2.8 Două kg de aer (considerat gaz perfect) efectuează procesul redat în fig. 6.12.

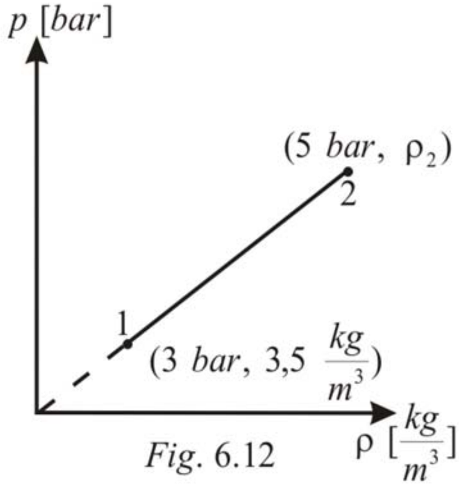


Fig. 6.12

Se cer:

a) Să se precizeze natura procesului. Justificare;

b) Parametrii de stare măsurabili în fiecare stare;

c) Variațiile mărimilor de stare analitice;

d) Schimburile energetice cu exteriorul.

Se vor considera căldurile specifice constante cu temperatura.

Rezolvare:

a) Pentru a preciza natura procesului se au în vedere:

- ecuația de stare a gazului scrisă sub forma:

$$p = \rho RT$$

- ecuația dreptei care trece prin origine: $p = \alpha \cdot \rho$

cu α = constant (vezi fig. 6.12)

Comparând cele două ecuații se deduce:

$$\alpha = RT = constant$$

Ceea ce înseamnă T = ct., adică 1-2 este un proces izoterm.

b) Parametrii de stare măsurabili în cele două stări sunt precizați sintetic în tab. 6.6.

Tab. 6.6

Starea	p [bar]	V[dm^3]	T[K]
1	3	571	299
2	5	342,6	299

Volumul în starea 1 este:

$$V_1 = \frac{m}{\rho_1} = \frac{2}{3,5} = 0,571\ m^3$$

Temperatura în starea 1 este:

$$T_1 = \frac{p_1}{\rho_1 R} = \frac{3 \cdot 10^5}{3{,}5 \cdot 287{,}041} = 299\ K = T_2 = T$$

Volumul în starea (2) se determină cu relația 6.12.

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{p_1}{p_2} = 571 \cdot \frac{3}{5} = 342{,}6\ dm^3$$

c) Variațiile mărimilor de stare (analitice):

$$\Delta U = \Delta H = \Delta L_d = 0$$

d) schimburile energetice cu exteriorul se determină folosind relațiile 6.18 şi 6.13:

$$Q_{12} = L_{12} = L_{t_{12}} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} =$$

$$= 3 \cdot 10^5 \cdot 571 \cdot 10^{-3} \ln \frac{342{,}6}{571} = -171300 \cdot 0{,}5108$$

$$= 102780\ J = -102{,}78\ kJ$$

6.3. Probleme propuse

6.3.1. O cantitate de $0{,}9\ kg$ aer cu presiunea de $20\ bar$ şi temperatura $160^\circ C$ suferă o transformare la volum constant până la temperatura $360^\circ C$, apoi o transformare la presiune constantă până când volumul devine de două ori mai mare, iar în final o transformare adiabată până ce presiunea aerului ajunge la valoarea inițială.

Se cer următoarele :

a) Mărimile de stare la sfârşitul fiecărei transformări ;
b) Lucrul mecanic şi căldura schimbate cu exteriorul pe fiecare transformare;
c) Să se reprezinte această succesiune de transformări în diagrama $p - V$.

Se consideră că valoarea căldurii specifice nu depinde de temperatură ; $k = 1{,}4$.

.

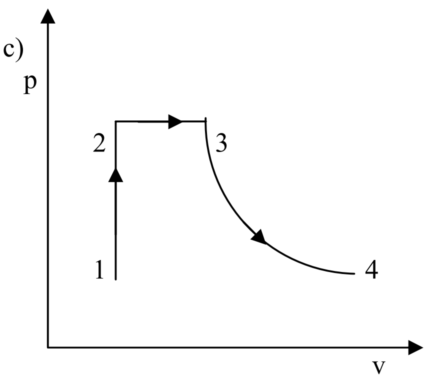
R : a)

Starea	$p\ [bar]$	$V\ [m^3]$	$T\ [K]$
1	20	0,056	433
2	29,23	0,056	633
3	29,23	0,112	1266
4	20	0,147	1138

b)

Transf.	$L\ [J]$	$Q\ [J]$
1 – 2	0	129.168
2 – 3	163.688	572.506
3 – 4	+82.667	0

c)



6.3.2. Într-un cilindru se destind adiabat $\nu = 0{,}02\ kmol$ de azot de la temperatura de $330\ K$, efectuând un lucru mecanic de $5800\ J$. Să se determine temperatura gazului la sfârşitul destinderii. Valorile pentru exponentul adiabatic k, masa molară şi constanta azotului se vor citi în anexa 11.

R : $T_2 = 316\ K$

6.3.3. Un compresor centrifugal comprimă adiabat aer de la $p_1 = 0{,}1\ MPa$ şi $t_1 = 20^\circ C$ până la $p_2 = 0{,}4\ MPa$. Să se determine lucrul mecanic tehnic schimbat de compresor cu exteriorul pentru $1\ kg$ de aer comprimat.

R : $l_{t_{1-2}} = -143{,}13\ kJ/kg$

6.3.4. În cilindrul unui compresor la începutul procesului de comprimare se află o cantitate de aer la parametrii : $p_1 = 1\ bar$; $T_1 = 290\ K$; $V_1 = 4 \cdot 10^{-3} \cdot m^3$. La sfârşitul procesului de comprimare politropic aerul are parametrii : $p_2 = 3\ bar$; $T_2 = 373{,}6\ K$. Să se determine :

a) exponentul politropic al procesului de comprimare ;

b) lucrul mecanic şi lucrul mecanic tehnic schimbat cu exteriorul în timpul procesului ;
c) căldura schimbată cu mediul exterior în timpul procesului.

R : a) $n = 1{,}3$

b) $L_{12} = -384{,}3\ J$

$L_{t_{12}} = -499{,}6\ J$

c) $Q_{12} = -95{,}9\ J$

6.4. Test grilă

- *Timp de lucru: 30 min.*
- *Fiecare întrebare se punctează cu 0,5 puncte.*

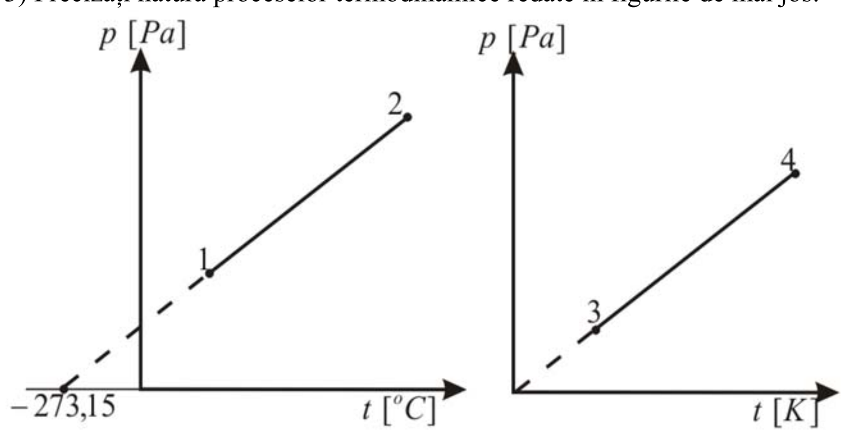
1) Într-un proces izocor, schimbul de căldură este de *200 kJ*. Care dintre afirmațiile de mai jos sunt adevărate:

a) $L_{12} = 200\ kJ$; b) $L_{12} = -200\ kJ$; c) $L_{12} = 0$;
d) $L_{12} = 100\ kJ$; e) $U_2 - U_1 = 0$; f) $U_2 - U_1 = 200\ kJ$.

2) Într-un proces izocor creşterea de presiune este de *4 bar,* volumul fiind de *0,01 l.* Care dintre afirmațiile de mai jos sunt adevărate:

a) $L_{12} = L_{t_{12}}$; b) $L_{t_{12}} = -4\ J$; c) $L_{t_{12}} = 4\ J$;
d) $L_{t_{12}} = 0$; e) $H_2 - H_1 = 0$; f) $Q_{12} = 0$.

3) Precizați natura proceselor termodinamice redate în figurile de mai jos:



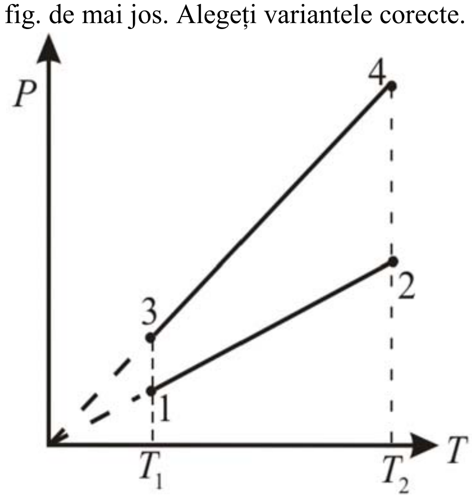
a) 1-2 proces adiabat;
3-4 proces adiabat;

b) 1-2 proces izocor;
3-4 proces adiabat;

c) 1-2 proces izocor;
3-4 proces izocor;

d) 1-2 proces adiabat;
3-4 proces izocor.

4) Aceeaşi masă de gaz perfect suferă procesele 1-2 respectiv 3-4 redate grafic în fig. de mai jos. Alegeţi variantele corecte.



a) 1-2 este un proces izocor (V_{12} = ct)
3-4 este un proces izocor (V_{34} = ct)
$V_{12} > V_{34}$

b)1-2 este un proces izocor (V_{12} = ct)
3-4 este un proces izocor (V_{34} = ct)
$V_{12} < V_{34}$

c) 1-2 este un proces adiabat
3-4 este un proces adiabat
$L_{12} < L_{34}$

d) nici una din variantele a, b, c, nu este corectă.

5) Într-un proces izobar schimbul de căldură este de *300 J*. Care dintre afirmaţiile de mai jos sunt adevărate:

a) $L_{12} = 0;$ b) $L_{t_{12}} = 300\ J;$ c) $L_{t_{12}} = 0;$
d) $H_2 – H_1 = 300\ J;$ e) $H_2 – H_1 = -300\ J;$ f) $\Delta H = 0.$

6) Într-un proces izobar, creşterea de volum este de *0,1 l,* presiunea fiind de *4 bar.* Care dintre relaţiile de mai jos sunt adevărate:

a) $L_{12} = 4\ J;$ b) $Q_{12} = 0,4\ J;$ c) $L_{12} = 0;$
d) $L_{t_{12}} = 0;$ e) $L_{12} = 40\ J;$ f) $L_{t_{12}} = 40\ J.$

7) Într-un proces izoterm schimbul de căldură este de 500 J. Care dintre următoarele afirmaţii sunt adevărate:

a) $L_{12} = 500$ J; b) $L_{t_{12}} = 500\ J;$ c) $L_{12} < L_{t_{12}}$
d) $\Delta U = 250\ J;$ e) $\Delta H = 250\ J;$ f) $\Delta H = \Delta U = 0.$

8) Un gaz suferă un proces izoterm de la starea inițială ($p_1 = 2\ bar,\ V_1 = 1,4\ l$) până la starea finală în care volumul scade de *2,71 ori*. Care dintre afirmațiile de mai jos sunt adevărate:

a) $L_{12} = 2800\ J;$ b) $L_{12} = 0,28\ kJ;$ c) $L_{12} = -0,28\ kJ;$

d) $L_{t_{12}} = -280\ J;$ e) $|Q_{12}| = 280\ J;$ f) $\Delta U = \Delta \mathrm{H} = 280\ J.$

9) Într-un proces adiabat schimbul de lucru mecanic tehnic este de *400 J.* Care dintre următoarele afirmații sunt adevărate:

a) $\Delta \mathrm{H} = 400\ J;$ b) $\Delta \mathrm{H} = -0,4\ kJ;$ c) $\Delta U = -400\ J;$

d) $\Delta U = \Delta H;$ e) $\Delta \mathrm{H} = 0;$ f) $\Delta U = 0.$

10) Într-un proces adiabat schimbul de lucru mecanic absolut este de *0,6 MJ.* Care dintre următoarele afirmații sunt adevărate:

a) $\Delta U = -600\ kJ;$ b) $\Delta U = 600\ kJ;$ c) $\Delta U = \Delta H;$

d) $\Delta U = 0;$ e) $|Q_{12}| = L_{12} = L_{t_{12}} = 600\ kJ;$

f) $\Delta L_d = \Delta U.$

11) Într-un proces termodinamic *(k = 1,4),* variația de energie internă este $\Delta U = 800\ J.$ Care dintre afirmațiile de mai jos sunt adevărate:

a) $\Delta \mathrm{H} = 1,12\ kJ;$ b) $\Delta L_d = 320\ J;$ c) $\Delta \mathrm{H} = k \cdot \Delta L_d;$

d) $\Delta \mathrm{H} = k \cdot \Delta U;$ e) $\Delta H = \Delta U;$ f) $\Delta L_d = \Delta U.$

12) Precizați în care dintre următoarele procese este adevărată relația $\Delta U = mc_v \Delta T$:

a) numai în procesul izocor; b) numai în procesul izobar;
c) numai în procesul izoterm; d) numai în procesul adiabat;
e) în orice proces termodinamic; f) în nici un proces termodinamic.

13) Precizați în care dintre următoarele procese este adevărată relația $dH = mc_p dT$:

a) numai în procesul izocor; b) numai în procesul izobar;
c) numai în procesul izoterm; d) numai în procesul adiabat;
e) în orice proces termodinamic; f) în nici un proces termodinamic.

14) Precizați care dintre următoarele afirmații sunt adevărate pentru un proces politropic:

a) $dp \neq 0,\ dV \neq 0,\ dT \neq 0;$ b) $dp = 0,\ dV \neq 0,\ dT \neq 0;$

c) $dp \neq 0,\ dV = 0,\ dT \neq 0;$ d) $dp \neq 0,\ dV \neq 0,\ dT = 0;$

e) $dp \neq 0,\ dV \neq 0,\ \delta Q \neq 0;$ f) $\delta L \neq 0,\ \delta L_t \neq 0,\ dU = 0;$

15) Precizați în care dintre următoarele procese este adevărată relația: $Q_{12} = m \cdot c_p \Delta T$.

a) numai în procesul izocor; b) numai în procesul izobar;
c) numai în procesul izoterm; d) numai în procesul adiabat;
e) numai în proces politropic; f) în orice proces termodinamic.

16) Precizați în care din următoarele procese este adevărată relația: $\delta Q = m \cdot c_v dT$:

a) numai în procesul izocor; b) numai în procesul izobar;
c) numai în procesul izoterm; d) numai în procesul adiabat;
e) numai în proces politropic; f) în orice proces termodinamic.

17) În cazul *n = 0*, politropa ($p \cdot V^n = ct.$) devine:

a) izocoră; b) izobară; c) izotermă;
d) adiabată; e) nici una din variantele a, b, c, d, nu este corectă;
f) variantele a, b, c, d sunt toate adevărate.

18) În cazul *n = 1,* politropa ($p \cdot V^n = ct.$) devine:

a) izocoră; b) izobară; c) izotermă;
d) adiabată; e) nici una din variantele a, b, c, d, nu este corectă;
f) variantele a, b, c, d sunt toate adevărate.

19) În ce situații politropa $p \cdot V^n = ct$ devine izocoră:

a) când *n = 0;* b) când *n = 1;* c) când *n = k;*
d) când $n \to +\infty$; e) când $n \to -\infty$; f) când $n \to \pm\infty$;

20) Într-un proces politropic se cunosc *n = 0,8* și *k = 1,4*. Raportul $\frac{c_n}{c_v}$ este:

a) 3; b) 1; c) -3; d) -1; e) 0,571;
f) 1,75.

CAPITOLUL 7

CICLURI TERMODINAMICE ENTROPIE. PRINCIPIUL AL II-LEA AL TERMODINAMICII

7.1. Relații de calcul

a) Căldură primită de la sursa caldă :

$$Q' = \sum_{i=1}^{p} Q_i' \qquad (7.1.)$$

în care p - este numărul transformărilor în care se primește căldură, iar Q_i' - căldura primită pe fiecare transformare.

b) Căldura cedată sursei reci :

$$Q'' = \sum_{i=1}^{c} Q_i'' \qquad (7.2.)$$

în care c - este numărul transformărilor în care se cedează căldură, iar Q_i'' - căldura cedată pe fiecare transformare.

c) Lucrul mecanic schimbat cu exteriorul :

$$L = \sum_{i=1}^{n} L_i \qquad (7.3.)$$

unde n este numărul transformărilor din ciclu, iar L_i - lucrul mecanic schimbat cu exteriorul pe fiecare transformare.

d) Relația dintre lucrul mecanic și căldura schimbată cu exteriorul :

- pentru ciclul direct :

$$L = Q' - |Q''| \qquad (7.4.)$$

- pentru ciclul inversat :

$$L = |Q'| - Q'' \qquad (7.5.)$$

e) Randamentul termic al ciclului direct :

$$\eta_t = \frac{L}{Q'} = \frac{Q' - |Q''|}{Q'} = 1 - \frac{|Q''|}{Q'} \qquad (7.6.)$$

f) Eficiența ciclului inversat :

- cazul instalațiilor frigorifice (eficiența frigorifică) :

$$\varepsilon_f = \frac{Q''}{|L|} = \frac{Q''}{|Q'| - Q''} >< 1 \qquad (7.7.)$$

- cazul pompelor de căldură (eficiența calorică) :

$$\mu = \frac{|Q'|}{|L|} = \frac{|Q'|}{|Q'| - Q''} > 1 \qquad (7.8.)$$

- cazul instalațiilor mixte (frigorifico-calorice) :

$$\varphi = \frac{Q'' + |Q'|}{|L|} = \frac{|Q'| + Q''}{|Q'| - Q''} > 1 \qquad (7.9.)$$

g) Condiția de ciclu Carnot : $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$ (7.10.)

h) Funcția Carnotică : $\frac{Q'}{T'} + \frac{Q''}{T''} = 0$ (7.11.)

i) Randamentul termic al ciclului Carnot direct :

$$\eta_{tc} = 1 - \frac{T''}{T'} \qquad (7.12.)$$

j) Randamentul termic al ciclului Carnot inversat :

- cazul instalațiilor frigorifice (eficiența frigorifică) :

$$\varepsilon_{f_c} = \frac{T''}{T' - T''} \qquad (7.13.)$$

- cazul pompelor de căldură (eficiența calorică) :

$$\mu_c = \frac{T'}{T' - T''} \qquad (7.14.)$$

- cazul instalațiilor mixte (frigorifico-calorice) :

$$\varphi_c = \frac{T' + T''}{T' - T''} \qquad (7.15.)$$

k) Integrala lui Clasius pentru cicluri reversibile :

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \qquad (7.16.)$$

l) Relația de definiție a entropiei :

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \qquad (7.17.)$$

m) Expresiile matematice ale principiului al doilea al termodinamicii pentru procese ireversibile :

$$dS > \frac{\delta Q}{T} \tag{7.18.}$$

sau :
$$dS = dS_e + dS_i \tag{7.19.}$$

în care :
$$dS_e = \frac{\delta Q_e}{T} \tag{7.20.}$$

este variația entropiei sistemului determinată de schimbul de căldură cu exteriorul δQ_e , iar :
$$dS_i = \frac{\delta Q_i}{T} \tag{7.21.}$$

este variația entropiei sistemului determinată de cauze de ireversibilitate. T este temperatura termodinamică a sursei :

n) Relațiile de legătură între principiul întâi și principiul al doilea al termodinamicii (relația fundamentală a termodinamicii) :
   - pentru sisteme închise :
$$T \cdot dS = dU + p \cdot dV \tag{7.22.}$$
$$T \cdot dS = T \cdot \left(dS_e + dS_i\right) = dU + p \cdot dV \tag{7.23.}$$
   - pentru sisteme deschise :
$$T \cdot dS = dH - V \cdot dp \tag{7.24.}$$
$$T \cdot \left(dS_e + dS_i\right) = dH - V \cdot dp \tag{7.25.}$$

o) Variația entropiei în procese reversibile :
$$\Delta S = m \cdot \overline{c}_V \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + m \cdot R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{7.26.}$$
$$\Delta S = m \cdot \overline{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - m \cdot R \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} \tag{7.27.}$$

p) Variația entropiei în procesul de laminare a gazelor perfecte :
$$\Delta S = \Delta S_i = m \cdot R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} \tag{7.28.}$$

în care p_1 este presiunea gazului înainte de laminare, iar p_2 este presiunea gazului după laminare.

q) Variația entropiei în procesul de amestecare a gazelor perfecte prin difuzie:
$$\Delta S_{i,am} = m_{am} \cdot R_{am} \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot \ln \frac{1}{r_i} \tag{7.29.}$$

unde r_i reprezintă participația volumică a componentului i din amestec.

r) Lucrul mecanic minim de separare a componentelor din amestec :
$$\left|L_{sep}^{\min}\right| = T_{am} \cdot \Delta S_{i,am} \tag{7.30.}$$

7.2. Probleme rezolvate

7.2.1. Într-o maşină termică se utilizează ca agent termic azotul. La intrarea în maşină parametrii de stare sunt : $p_1 = 1\ bar$, $t_1 = 327^\circ C$, $V_1 = 100\ dm^3$**. Din această stare gazul efectuează următorul ciclu :**

- **o răcire izobară până când volumul scade de 2,5 ori ;**
- **o încălzire izocoră până când presiunea creşte de 7,5 ori ;**
- **o destindere politropă până la starea inițială.**

Se consideră căldurile specifice masice constante cu temperatura. Se cer :

a) **Mărimile termodinamice de stare în punctele caracteristice ale ciclului. Reprezentarea ciclului în diagrama** $p-V$ **, ;**

b) **Variațiile mărimilor de stare analitice pe fiecare transformare :**
- **variația energiei interne ;**
- **variația entalpiei ;**
- **variația lucrului mecanic de dislocare ;**
- **variația entropiei şi reprezentarea ciclului în diagrama** $T-S$;

c) **Schimburile energetice cu exteriorul pe fiecare transformare :**
- **schimbul de lucru mecanic absolut ;**
- **schimbul de lucru mecanic tehnic ;**
- **schimbul de căldură.**

d) **Verificarea calculelor pe baza bilanțului energetic. Diagrama Sankey ;**

e) **Randamentul termic al ciclului ;**

f) **Puterea teoretică dezvoltată de maşină dacă turația de lucru este** $n_m = 4500\ rot/\min$**.**

Rezolvare :

a) Valorile mărimilor de stare în punctele caracteristice ale ciclului sunt prezentate în tab. 7.1. , iar reprezentarea grafică a celor trei procese este redată în fig. 7.1. (diagrama $p-V$).

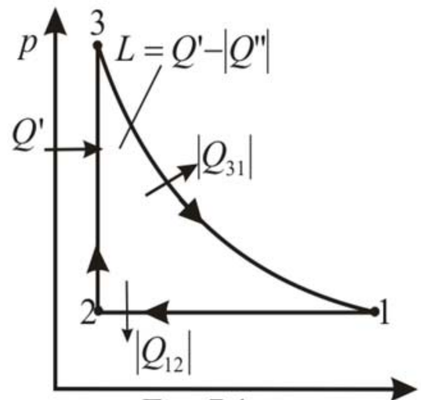


Fig. 7.1

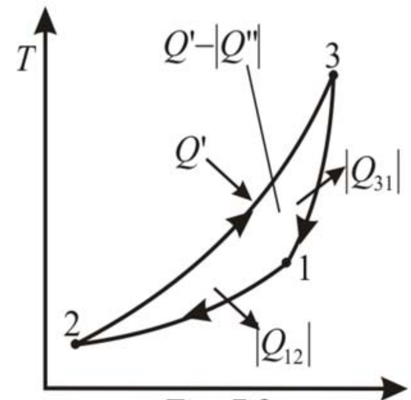


Fig. 7.2

Tabel 7.1.

M / S	$p\ [bar]$	$V\ [dm^3]$	$T\ [K]$
1	1	100	600
2	1	40	240
3	7,5	40	1800

Starea 1. Conform datelor din enunţ parametrii termodinamici de stare în starea 1 sunt :

$$p_1 = 1\ bar = 10^5\ Pa;\ V_1 = 100\ dm^3 = 0{,}1\ m^3$$

$$T_1 = t_1 + 273 = 327 + 273 = 600\ K$$

Starea 2. Deoarece $1-2$ este o transformare izobară, avem :

$$p_2 = p_1 = 1\ bar$$

$$V_2 = \frac{V_1}{2{,}5} = \frac{100}{2{,}5} = 40\ dm^3$$

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{V_2}{V_1} = 600 \cdot \frac{40}{100} = 240\ K$$

Starea 3. Deoarece $2-3$ este izocoră, rezultă :

$$V_3 = V_2 = 40\ dm^3$$

$$p_3 = 7{,}5 \cdot p_1 = 7{,}5\ bar \text{ (vezi enunţul)}$$

$$T_3 = T_2 \cdot \frac{p_3}{p_2} = 240 \cdot \frac{7,5}{1} = 1800 \ K$$

Valorile obținute se centralizează în tabelul 7.1.

b) Variația mărimilor de stare analitice pe fiecare transformare:

Variația de energie internă

- pentru izobara $1-2$

$$U_2 - U_1 = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

în care m - este masa de gaz şi se determină aplicând ecuația termică de stare pentru starea inițială.

$$m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_{N_2} \cdot T_1} = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot M_{N_2}}{R_M \cdot T_1} = \frac{10^5 \cdot 0,1 \cdot 28}{8314 \cdot 600} = 56,13 \cdot 10^{-3} \ kg$$

iar :
$$c_v = \frac{R}{k-1} = \frac{R_M}{M_{N_2} \cdot (k-1)} = \frac{8314}{28 \cdot (1,4-1)} = 742,3 \ J/kg \cdot K$$

($k = 1,4$ extras din anexa 11).

$$c_p = k \cdot c_v = 1,4 \cdot 742,3 = 1039,3 \ J/kg \cdot K$$

Prin urmare :

$$U_2 - U_1 = 56,13 \cdot 10^{-3} \cdot 742,3 \cdot (240 - 600) = -14999,5 \ J$$

- pentru izocora $2-3$:

$$U_3 - U_2 = m \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) = 56,13 \cdot 10^{-3} \cdot 742,3 \cdot (1800 - 240) = 64997,9 \ J$$

- pentru politropa $3-1$:

$$U_1 - U_3 = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_3) = 56,13 \cdot 10^{-3} \cdot 742,3 \cdot (600 - 1800) = -49998,4 \ J$$

Se constată că pentru întreg ciclul se verifică faptul că :

$$U_2 - U_1 + U_3 - U_2 + U_1 - U_3 = 0$$

Ceea ce era deja cunoscut întrucât pe ciclu $\oint dU = 0$.

Variația de entalpie

Considerăm că pe fiecare transformare sistemul este deschis :

- pentru izobara $1-2$:

$$H_2 - H_1 = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = m \cdot c_v \cdot k \cdot (T_2 - T_1) = k \cdot (U_2 - U_1) =$$
$$= 1,4 \cdot (-14999,5) = -20993 \ J$$

- pentru izocora $2-3$:

$$H_3 - H_2 = k \cdot (U_3 - U_2) = 1,4 \cdot 64997,9 = 90990,8 \ J$$

- pentru politropa $3-1$:

$$H_1 - H_3 = k \cdot (U_1 - U_3) = 1{,}4 \cdot (-49998{,}4) = -69997{,}8 \ J$$

Se constată de asemenea că :

$$H_2 - H_1 + H_3 - H_2 + H_1 - H_3 = 0$$

ceea ce era cunoscut întrucât pe ciclu $\oint dH = 0$.

Variația lucrului mecanic de dislocare

Considerăm că pe fiecare transformare sistemul este deschis.

- pentru izobara $1-2$:

$$L_{d_2} - L_{d_1} = p_2V_2 - p_1V_1 = p_1 \cdot (V_2 - V_1) = 1 \cdot 10^5 \cdot (400 - 100) \cdot 10^{-3} = -6000 \ J$$

- pentru izocora $2-3$:

$$L_{d_3} - L_{d_2} = p_3V_3 - p_2V_2 = (p_3 - p_2) \cdot V_2 = (7{,}5 - 1) \cdot 10^5 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 26000 \ J$$

- pentru politropa $3-1$:

$$L_{d_1} - L_{d_3} = p_1V_1 - p_3V_3 = 1 \cdot 10^5 \cdot 100 \cdot 10^{-3} - 7{,}5 \cdot 10^5 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = -20000 \ J$$

Se constată de asemenea că :

$$L_{d_2} - L_{d_1} + L_{d_3} - L_{d_2} + L_{d_1} - L_{d_3} = 0$$

ceea ce era cunoscut întrucât lucrul mecanic de dislocare este mărime de stare, deci pe ciclu $\oint dL_d = 0$.

Variația entropiei

- pentru izobara $1-2$: $\qquad dS = \dfrac{\delta Q_p}{T} = \dfrac{m \cdot c_p \cdot dT}{T}$

$$S_2 - S_1 = m \cdot c_p \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = m \cdot c_p \cdot \ln\frac{T_2}{T_1} = 56{,}13 \cdot 10^{-3} \cdot 1039{,}3 \cdot \ln\frac{240}{600} = -53{,}439 \ J/K$$

- pentru izocora $2-3$: $\qquad dS = \dfrac{\delta Q_v}{T} = \dfrac{m \cdot c_v \cdot dT}{T}$

$$S_3 - S_2 = m \cdot c_v \cdot \int_{T_2}^{T_3} \frac{dT}{T} = m \cdot c_v \cdot \ln\frac{T_3}{T_2} = 56{,}13 \cdot 10^{-3} \cdot 742{,}3 \cdot \ln\frac{1800}{240} = 83{,}951 \ J/K$$

- pentru politropă $3-1$: $\qquad dS = \dfrac{\delta Q_n}{T} = \dfrac{m \cdot c_n \cdot dT}{T}$

$$S_1 - S_3 = m \cdot c_n \cdot \int_{T_3}^{T_1} \frac{dT}{T} = m \cdot c_n \cdot \ln\frac{T_1}{T_3}$$

în care c_n este căldura specifică politropică :

$$c_n = \frac{n-k}{n-1} \cdot c_v$$

Indicele politropic n se obține din logaritmarea ecuației :

$$p_1 \cdot V_1^n = p_3 \cdot V_3^n$$

rezultând : $$n = \frac{\ln \frac{p_3}{p_1}}{\ln \frac{V_1}{V_3}} = \frac{\ln(7{,}5/1)}{\ln(100/40)} = 2{,}2$$

Atunci : $$c_n = \frac{2{,}2-1{,}4}{2{,}2-1} \cdot 742{,}3 = 494{,}80 \ \ J/kg \cdot K$$

Prin înlocuire găsim :

$$S_1 - S_3 = 56{,}13 \cdot 10^{-3} \cdot 494{,}80 \cdot \ln \frac{600}{1800} = -30{,}511 \ \ J/K$$

Se constată că pentru întreg ciclu avem :

$$S_2 - S_1 + S_3 - S_2 + S_1 - S_3 = 0$$

adică, $\oint dS = 0$, adevărată pentru un ciclu reversibil.

Variațiile mărimilor de stare sunt prezentate sintetic în tabelul 7.2.

Tabelul 7.2.

Transformarea	ΔU $[J]$	ΔH $[J]$	ΔL_d $[J]$	ΔS $[J/K]$
$1-2$	-14.999,5	-20.993	-6.000	-53,439
$2-3$	64.997,9	90.990,8	26.000	83,950
$3-1$	-49.998,4	-69.997,8	-20.000	-30,611
$\sum$	0	0	0	0

Reprezentarea ciclului în diagrama $T-S$ este redată în fig. 7.2.

c) Schimburile energetice cu exteriorul pentru fiecare transformare.

<u>Schimbul de lucru mecanic absolut</u>

$$L_{1-2} = p_1 \cdot (V_2 - V_1) = 1 \cdot 10^5 \cdot (40-100) \cdot 10^{-3} = -6000 \ \ J$$

$$L_{2-3} = 0$$

$$L_{3-1} = \frac{1}{n-1} \cdot \left(p_3 \cdot V_3 - p_1 \cdot V_1 \right) = \frac{1}{2{,}2-1} \cdot \left(7{,}5 \cdot 10^5 \cdot 40 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^5 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \right) =$$

$$= 16667 \; J$$

Schimbul de lucru mecanic tehnic $\qquad L_{t_{1-2}} = 0$

$$L_{t_{2-3}} = \int_2^3 -V \cdot dp = -V \int_2^3 dp = -V_2 \cdot \left(p_3 - p_2 \right) = 4 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 7{,}5) \cdot 10^5 = -26000 \; J$$

$$L_{t_{3-1}} = n \cdot L_{3-1} = 2{,}2 \cdot 16667 = 36337{,}4 \; J$$

Schimbul de căldură

$$Q_{1-2} = m \cdot c_p \cdot \left(T_2 - T_1 \right) = 56{,}13 \cdot 10^{-3} \cdot 1039{,}3 \cdot (240 - 600) = -21000 \; J$$

$$Q_{2-3} = m \cdot c_v \cdot \left(T_3 - T_2 \right) = 56{,}13 \cdot 10^{-3} \cdot 742{,}3 \cdot (1800 - 240) = 64997{,}9 \; J$$

$$Q_{3-1} = m \cdot c_n \cdot \left(T_1 - T_3 \right) = 56{,}13 \cdot 10^{-3} \cdot 494{,}85 \cdot (600 - 1800) = -33331{,}4 \; J$$

Aceleaşi rezultate se obțineau şi aplicând primul principiu al termodinamicii, fiind acceptate erori de până la 1% datorită calculelor :

$$Q_{1-2} = \left(U_2 - U_1 \right) + L_{12} = -14999{,}5 - 6000 = -20999 \; J$$

$$Q_{2-3} = \left(U_3 - U_2 \right) + L_{23} = 64997{,}9 + 0 = 64997{,}9 \; J$$

$$Q_{3-1} = \left(U_1 - U_3 \right) + L_{13} = -49998{,}4 + 16667 = -33331{,}4 \; J$$

Rezultatele sunt prezentate sintetic în tabelul 7.3.

Tabelul 7.3.

Transformarea	$L_{ij}\ [J]$	$L_{t_{ij}}\ [J]$	$Q_{ij}\ [J]$
$1-2$	-6.000	0	-21.000,0
$2-3$	0	-26.000	64.997,9
$3-1$	16.667	36.667	-33.331,4
$\sum$	10.667	10.667	10.667

d) Verificarea calculelor pe baza bilanțului energetic. Diagrama Sankey.

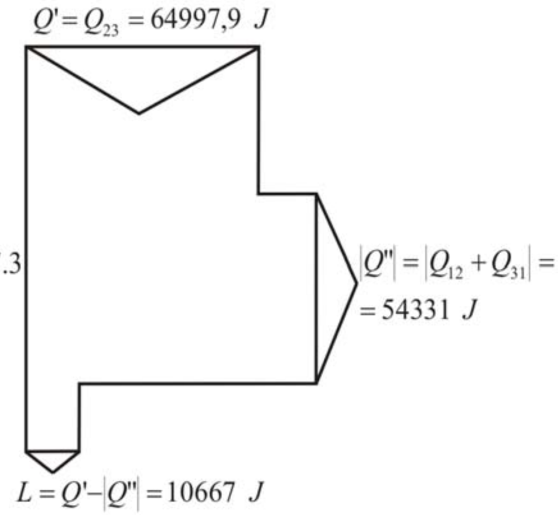


Fig. 7.3

$$L = L_{12} + L_{23} + L_{31} = -6000 + 0 + 16667 = 10667\ \ J/ciclu$$

$$L_t = L_{t_{12}} + L_{t_{23}} + L_{t_{31}} = 0 - 26000 + 36667 = 10667\ \ J/ciclu$$

Se observă că $L = L_t$ ceea ce era cunoscut pentru un ciclu (aria ciclului față de axa volumelor, L, este egală cu aria ciclului față de axa presiunilor, L_t).

$$L = L_t = Q' - |Q''| = Q_{23} - |Q_{12} + Q_{31}| = 64997{,}9 - |21000 + 33331{,}4| = 10667\ \ J$$

În fig. 7.3. este redată diagrama Sankey a ciclului.

e) Randamentul ciclului :

$$\eta_t = \frac{L}{Q'} = \frac{10667}{64997{,}9} = 0{,}164 = 16{,}4\%$$

unde $Q' = Q_{23}$ - este căldura primită de la sursa caldă.

f) Puterea teoretică dezvoltată de mașina termică la turația $n_m = 4500\ \ rot/\min$, dacă ciclul motor se efectuează într-o rotație, este :

$$P_t = L \cdot \frac{n_m}{60} = 10667 \cdot \frac{4500}{60} = 800000\ W = 800\ \ kW$$

7.2.2. Să se determine creşterea de entropie pentru $1\ kg$ de aer datorită amestecării şi lucrul mecanic minim necesar a fi consumat pentru separarea oxigenului şi azotului din amestec aflat la $T_0 = 293\ K$. Se cunosc participațiile volumice ale componenților aerului : $r_{O_2} = 0{,}21$, $r_{N_2} = 0{,}79$.

Rezolvare :

Prin aplicarea relației (7.29.) rezultă :

$$\Delta S_{i,am} = m_{am} \cdot R_{am} \cdot \left(r_{O_2} \ln \frac{1}{r_{O_2}} + r_{N_2} \ln \frac{1}{r_{N_2}} \right)$$

$$\Delta S_{i,am} = 1 \cdot 287 \cdot \left(0{,}21 \cdot \ln \frac{1}{0{,}21} + 0{,}79 \cdot \ln \frac{1}{0{,}79} \right) = 146{,}7\ \ J/K$$

$$\left| L_{ep}^{\min} \right| = T_{am} \cdot \Delta S_{i,am} = T_0 \cdot \Delta S_{i,am} = 293 \cdot 146{,}7 = 4300\ \ J$$

7.2.3. Într-o maşină termică se utilizează ca agent termic metan . La intrarea în maşină parametrii de stare sunt : $p_1 = 1\ bar$, $t_1 = 127^\circ C$, $V_1 = 2\ l$. Din această stare gazul efectuează următorul ciclu :

- **comprimare adiabată până la presiunea $p_2 = 3\ bar$;**
- **încălzire izocoră până la presiunea $p_3 = 11\ bar$;**
- **încălzire izobară până la temperatura $T_4 = 2300\ K$;**
- **destindere izotermă până la volumul inițial ;**
- **răcire izocoră până în starea inițială.**

Se consideră căldurile specifice masice constante cu temperatura.

Se cer :

a) Mărimile termodinamice în punctele caracteristice ale ciclului; reprezentarea ciclului în diagrama $p - V$;

b) Variațiile mărimilor de stare analitice pe fiecare transformare :

- **variația energiei interne ;**
- **variația entalpiei ;**
- **variația lucrului mecanic de dislocare ;**
- **variația entropiei şi reprezentarea ciclului în diagrama $T - S$;**

c) Schimburile energetice cu exteriorul pe fiecare transformare :

- **schimbul de lucru mecanic absolut ;**
- **schimbul de lucru mecanic tehnic ;**
- **schimbul de căldură.**

d) verificarea calculelor pe baza bilanțului energetic. Diagrama Sankey ;
e) randamentul termic al ciclului ;
f) puterea teoretică dezvoltată de maşină dacă turația de lucru este $n_m = 5200\ rot/\min$ şi ciclul se desfăşoară la 2 rotații ale arborelui.

Rezolvare :

a) În fig. 7.4. este reprezentat ciclul în diagrama $p - V$. În tabelul 7.4. sunt centralizate valorile mărimilor de stare în punctele caracteristice ale ciclului.

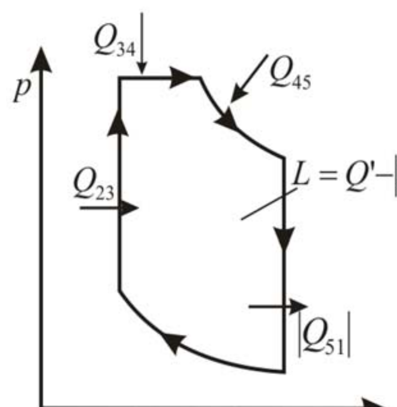


Fig. 7.4

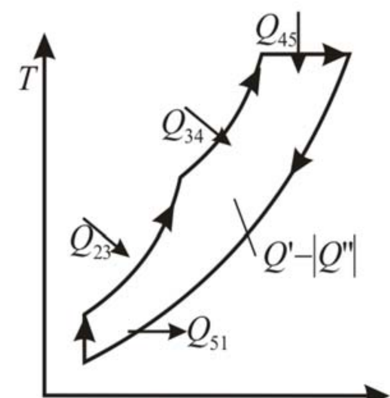


Fig. 7.5

Tabel 7.4.

S \ M	$p\ [bar]$	$V\ [dm^3]$	$T\ [K]$
1	1,000	2,000	400,000
2	3,000	0,859	515,424
3	11,000	0,859	1889,870
4	11,000	1,045	2300,000
5	5,747	2,000	2300,000

<u>Starea 1</u>

Conform datelor din enunțul problemei, valorile parametrilor de stare sunt :

$$p = 1\ bar = 10^5\ Pa;\ \ V_1 = 2\ l = 2\ dm^3 = 2 \cdot 10^{-3}\ m^3$$

$$T_1 = t_1 + 273 = 127 + 273 = 400\ K$$

<u>Starea 2.</u> Presiunea $p_2 = 3\ bar$ - dată în enunțul problemei.

Deoarece $1 - 2$ este o transformare adiabată, avem :

$$p_1 \cdot V_1^k = p_2 \cdot V_2^k; \qquad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$k = 1{,}3$ se citeşte din anexa 11.

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}} = 2 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{1,3}} = 0{,}859\ dm^3$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 400 \cdot \left(\frac{3}{1}\right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} = 515{,}424\ K$$

<u>Starea 3.</u> Din enunț se știe că $p_3 = 11\ bar$.

Cum $2-3$ este o transformare izocoră, rezultă :

$$V_2 = V_3 = 0{,}859\ dm^3$$

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3}$$

$$T_3 = T_2 \cdot \frac{p_3}{p_2} = 515{,}42 \cdot \frac{11}{3} = 1889{,}87\ K$$

<u>Starea 4.</u> Din enunț $T_4 = 2300\ K$.

Transformarea $3-4$ este izobară, deci :

$$p_3 = p_4 = 11\ bar$$

$$\frac{V_3}{T_3} = \frac{V_4}{T_4}$$

$$V_4 = V_3 \cdot \frac{T_4}{T_3} = 0{,}859 \cdot \frac{2300}{1889{,}87} = 1{,}045\ dm^3$$

<u>Starea 5</u>. Din enunț se știe că $V_5 = V_1 = 2\ dm^3$.

Transformarea $4-5$ este o izotermă, deci :

$$T_4 = T_5 = 2300\ K$$

$$p_4 \cdot V_4 = p_5 \cdot V_5$$

$$p_5 = p_4 \cdot \frac{V_4}{V_5} = 11 \cdot \frac{1{,}045}{2} = 5{,}747\ bar$$

b) Variația mărimilor de stare analitice pentru fiecare transformare.

Variaţia energiei interne

- pentru adiabata $1-2$:

$$U_2 - U_1 = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

în care masa de gaz şi se determină aplicând ecuaţia termică de stare pentru starea iniţială.

$$m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_{CH_4} \cdot T_1} = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot M_{CH_4}}{R_M \cdot T_1} = \frac{10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 16}{8314 \cdot 400} = 0{,}96 \cdot 10^{-3}\ kg$$

iar :

$$c_v = \frac{R}{k-1} = \frac{R_M}{M_{CH_4} \cdot (k-1)} = \frac{8314}{16 \cdot (1{,}3-1)} = 1732\ J/kg \cdot K$$

$$c_p = k \cdot c_v = 1{,}3 \cdot 1732 = 2251{,}6\ J/kg \cdot K$$

Prin urmare :

$$U_2 - U_1 = 0{,}96 \cdot 10^{-3} \cdot 1732 \cdot (515{,}424 - 400) = 192\ J$$

- pentru izocora $2-3$:

$$U_3 - U_2 = m \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) = 0{,}96 \cdot 10^{-3} \cdot 1732 \cdot (1889{,}87 - 515{,}424) = 2285\ J$$

- pentru izobara $3-4$:

$$U_4 - U_3 = m \cdot c_v \cdot (T_4 - T_3) = 0{,}96 \cdot 10^{-3} \cdot 1732 \cdot (2300 - 1889{,}87) = 681{,}931\ J$$

- pentru izoterma $4-5$:

$$U_5 - U_4 = 0$$

- pentru izocora $5-1$:

$$U_1 - U_5 = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_5) = 0{,}96 \cdot 10^{-3} \cdot 1732 \cdot (400 - 2300) = -3159\ J$$

Variaţia entalpiei

Considerăm că pe fiecare transformare sistemul este deschis :

- pentru adiabata $1-2$:

$$H_2 - H_1 = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = m \cdot c_v \cdot k \cdot (T_2 - T_1) = k \cdot (U_2 - U_1) = 1{,}3 \cdot 192 = 250\ J$$

- pentru izocora $2-3$:

$$H_3 - H_2 = k \cdot (U_3 - U_2) = 1{,}3 \cdot 2285 = 2970\ J$$

- pentru izobara $3-4$:

$$H_4 - H_3 = k \cdot (U_4 - U_3) = 1{,}3 \cdot 682 = 887\ J$$

- pentru izoterma $4-5$:

$$H_5 - H_4 = 0$$

- pentru izocora $5-1$:

$$H_1 - H_5 = k \cdot (U_1 - U_5) = -1{,}3 \cdot 3159 = -4107\ J$$

Variația lucrului mecanic de dislocare

Considerăm că pe fiecare transformare sistemul este deschis.

- pentru adiabata $1-2$:

$$L_{d_2} - L_{d_1} = p_2V_2 - p_1V_1 = 3 \cdot 10^5 \cdot 0{,}859 \cdot 10^{-3} - 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 57{,}7\ J$$

- pentru izocora $2-3$:

$$L_{d_3} - L_{d_2} = p_3V_3 - p_2V_2 = 11 \cdot 10^5 \cdot 0{,}859 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^5 \cdot 0{,}859 \cdot 10^{-3} = 687{,}2\ J$$

- pentru izobara $3-4$:

$$L_{d_4} - L_{d_3} = p_4V_4 - p_3V_3 = 11 \cdot 10^5 \cdot 1{,}045 \cdot 10^{-3} - 11 \cdot 10^5 \cdot 0{,}859 \cdot 10^{-3} = 204{,}6\ J$$

- pentru izoterma $4-5$:

$$L_{d_5} - L_{d_4} = p_5V_5 - p_4V_4 = 5{,}747 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} - 11 \cdot 10^5 \cdot 1{,}045 \cdot 10^{-3} = -0{,}1\ J$$

- pentru izocora $5-1$:

$$L_{d_1} - L_{d_5} = p_1V_1 - p_5V_5 = 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} - 5{,}747 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = -949{,}4\ J$$

Se constată că :

$$L_{d_2} - L_{d_1} + L_{d_3} - L_{d_2} + L_{d_4} - L_{d_3} + L_{d_5} - L_{d_4} + L_{d_1} - L_{d_5} = 0$$

ceea ce este cunoscut deoarece lucrul mecanic de dislocare este mărime de stare, deci pe ciclu $\oint dL_d = 0$.

Variația entropiei

- pentru adiabata $1-2$: $\quad dS = \dfrac{\delta Q}{T} = 0$

$$S_2 - S_1 = 0$$

- pentru izocora $2-3$: $\quad dS = \dfrac{\delta Q_v}{T} = \dfrac{m \cdot c_v \cdot dT}{T}$

$$S_3 - S_2 = m \cdot c_v \cdot \int_{T_2}^{T_3} \frac{dT}{T} = m \cdot c_v \cdot \ln\frac{T_3}{T_2} = 0{,}96 \cdot 10^{-3} \cdot 1732 \cdot \ln\frac{1889{,}87}{515{,}424} =$$

$$= 2{,}160\ J/K$$

- pentru izobara $3-4$:

$$dS = \frac{\delta Q_p}{T} = \frac{m \cdot c_p \cdot dT}{T}$$

$$S_4 - S_3 = m \cdot c_p \cdot \int_{T_3}^{T_4} \frac{dT}{T} = m \cdot c_p \cdot \ln\frac{T_4}{T_3} = 0{,}96 \cdot 10^{-3} \cdot 2251{,}6 \cdot \ln\frac{2300}{1889{,}87} =$$

$$= 0{,}424 \;\; J/K$$

- pentru izoterma $4-5$ schimbul de căldură fiind egal cu schimbul de lucru mecanic absolut, putem scrie :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q_{45}}{T_4} = \frac{L_{45}}{T_4} = \frac{m \cdot R_{CH_4} \cdot T_4 \cdot \ln\frac{V_5}{V_4}}{T_4} = m \cdot R_{CH_4} \cdot \ln\frac{V_5}{V_4} = 0{,}96 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{8314}{16} \cdot$$

$$\cdot \ln\frac{2}{1{,}045} = 0{,}324 \;\; J/K$$

- pentru izocora $5-1$:
- $dS = \dfrac{\delta Q_v}{T} = \dfrac{m \cdot c_v \cdot dT}{T}$

$$S_1 - S_5 = m \cdot c_v \cdot \int_{T_5}^{T_1} \frac{dT}{T} = m \cdot c_v \cdot \ln\frac{T_1}{T_5} = 0{,}96 \cdot 10^{-3} \cdot 1732 \cdot \ln\frac{400}{2300} = 2{,}908 \;\; J/K$$

Se constată că un ciclu avem :

$$S_2 - S_1 + S_3 - S_2 + S_4 - S_3 + S_5 - S_4 + S_1 - S_5 = 0$$

adică, $\oint dS = 0$, adevărată pentru un ciclu reversibil.

Variațiile mărimilor de stare sunt prezentate sintetic în tabelul 7.5.

Tabelul 7.5.

Transformarea	$\Delta U\ [J]$	$\Delta H\ [J]$	$\Delta L_d\ [J]$	$\Delta S\ [J/K]$
$1-2$	192	250	57,7	0
$2-3$	2285	2970	687,2	2,160
$3-4$	682	887	204,6	0,424
$4-5$	0	0	-0,1	0,324
$5-1$	-3159	-4107	-949,4	-2,908
$\sum$	0	0	0	0

Reprezentarea ciclului în diagrama $T-S$ este prezentată în fig. 7.5.

c) Schimburile energetice cu exteriorul pentru fiecare transformare

Schimbul de lucru mecanic absolut

- pentru adiabata $1-2$:

$$L_{1-2}=\frac{1}{k-1}\cdot p_1\cdot V_1\cdot\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]=\frac{1}{1,3-1}\cdot 10^5\cdot 2\cdot 10^{-3}\left[1-\left(\frac{3}{1}\right)^{\frac{1,3-1}{1,3}}\right]=-192\ J$$

- pentru izocora $2-3$: $L_{2-3}=0$
- pentru izobara $3-4$:

$$L_{3-4}=p_3\cdot(V_4-V_3)=11\cdot 10^5\cdot(1,045-0,859)\cdot 10^{-3}=204,6\ J$$

- pentru izoterma $4-5$:

$$L_{4-5}=p_4\cdot V_4\cdot\ln\frac{p_4}{p_5}=11\cdot 10^5\cdot 1,045\cdot 10^{-3}\cdot\ln\frac{11}{5,747}=746,27\ J$$

- pentru izocora $5-1$: $L_{5-1}=0$

Schimbul de lucru mecanic tehnic

- pentru adiabata $1-2$:

$$L_{t_{1-2}}=k\cdot L_{1-2}=-1,3\cdot 192\cdot 10^{-3}=-250\ J$$

- pentru izocora $2-3$:

$$L_{t_{2-3}}=-V_2\cdot(p_3-p_2)=-0,859\cdot 10^{-3}\cdot(11-3)\cdot 10^5=-687,2\ J$$

- pentru izobara $3-4$: $L_{t_{3-4}}=0$
- pentru izoterma $4-5$: $L_{t_{4-5}}=L_{4-5}=746,27\ J$
- pentru izocora $5-1$:

$$L_{t_{5-1}}=-V_1\cdot(p_1-p_5)=-2\cdot 10^{-3}\cdot(1-5,747)\cdot 10^5=949,4\ J$$

Schimbul de căldură

- pentru adiabata $1-2$:

$$Q_{1-2}=0$$

- pentru izocora $2-3$:

$$Q_{2-3}=m\cdot c_v\cdot\Delta T=m\cdot c_v\cdot(T_3-T_2)=0,96\cdot 10^{-3}\cdot 1732\cdot(1889,87-515,424)=$$
$$=2285\ J$$

- pentru izobara $3-4$:

$$Q_{3-4}=m\cdot c_p\cdot\Delta T=0,96\cdot 10^{-3}\cdot 2251,6\cdot(2300-1889,87)=886,5\ J$$

- pentru izoterma $4-5$:

$$Q_{4-5} = L_{4-5} = 746{,}27 \ J$$

pentru izocora $5-1$:

$$Q_{5-1} = m \cdot c_v \cdot \Delta T = 0{,}96 \cdot 10^{-3} \cdot 1732 \cdot (400-2300) = -3159 \ J$$

Aplicând primul principiu al termodinamicii se obțin aproximativ aceleaşi rezultate, eroarea acceptată de până la 1% datorită calculelor :

$$Q_{1-2} = (U_2 - U_1) + L_{12} = 192 - 192 = 0$$

$$Q_{2-3} = (U_3 - U_2) + L_{23} = 2285 - 0 = 2285 \ J$$

$$Q_{3-4} = (U_4 - U_3) + L_{34} = 682 + 204{,}6 = 886{,}6 \ J$$

$$Q_{4-5} = (U_5 - U_4) + L_{45} = 0 + 746{,}27 = 746{,}27 \ J$$

$$Q_{5-1} = (U_1 - U_5) + L_{51} = -3159 + 0 = -3159 \ J$$

Rezultatele calculelor sunt centralizate în tabelul 7.6.

Tabelul 7.6.

Transformarea	L_{ij} $[J]$	$L_{t_{ij}}$ $[J]$	Q_{ij} $[J]$
$1-2$	-192,00	-250,00	0
$2-3$	0	-687,20	2285,00
$3-4$	204,60	0	886,50
$4-5$	746,27	746,27	746,27
$5-1$	0	949,40	-3159,00
$\sum$	758,80	758,50	758,80

d) Verificarea calculelor pe baza bilanțului energetic. Diagrama Sankey.

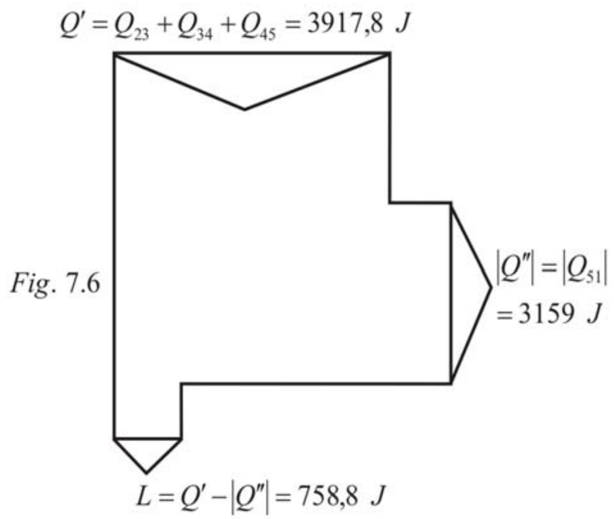


Fig. 7.6

$$L = L_{12} + L_{23} + L_{34} + L_{45} + L_{51} = 758{,}8\ J$$

$$L_t = L_{t_{12}} + L_{t_{23}} + L_{t_{34}} + L_{t_{45}} + L_{t_{51}} = 758{,}5\ J$$

Se observă că $L = L_t$ ceea ce era cunoscut pentru un ciclu (aria ciclului față de axa volumelor, L, este egală cu aria ciclului față de axa presiunilor, L_t).

$$L = L_t = Q' - |Q''| = 758{,}8\ J$$

În fig. 7.6. este redată diagrama Sankey a ciclului.

e) Randamentul ciclului :

$$\eta_t = \frac{L}{Q'} = \frac{758{,}8}{3917{,}8} = 0{,}193 = 19{,}3\%$$

unde $Q' = Q_{23} + Q_{34} + Q_{45}$ - este căldura primită de la sursa caldă.

f) Puterea teoretică dezvoltată de maşina termică la turația $n_m = 5200\ rot/\min$ este :

$$P_t = L \cdot \frac{n_m}{60} \cdot \frac{1}{2} = 758{,}8 \cdot \frac{5200}{60} \cdot \frac{1}{2} = 32881\ W$$

$$P_t = 33\ kW$$

7.2.4. Într-un cilindru închis cu un piston care se deplasează fără frecare se află o cantitate $V_N = 1\ m_N^3$ de amestec constituit din azot şi bioxid de carbon cu următoarele participaţii masice : $g_{N_2} = 0{,}4$, $g_{CO_2} = 0{,}6$.

În starea iniţială amestecul are presiunea $p_1 = 10\ bar$ şi temperatura $t_1 = 300^\circ C$. Din această stare amestecul evoluează efectuând următorul ciclu:

- **o destindere adiabată până când $V_2 = 3{,}5 \cdot V_1$;**
- **o comprimare izotermă până la valoarea volumului iniţial ;**
- **o încălzire izocoră până la starea iniţială.**

Se cer :

a) Mărimile termodinamice de stare în punctele caracteristice ale ciclului. Reprezentarea ciclului în coordonate $p-V$;

b) Variaţiile mărimilor de stare analitice pe fiecare transformare :
- **variaţia energiei interne ;**
- **variaţia entalpiei ;**
- **variaţia lucrului mecanic de dislocare ;**
- **variaţia entropiei şi reprezentarea ciclului în coordonate $T-S$;**

c) Schimburile energetice cu exteriorul pe fiecare transformare :
- **schimbul de lucru mecanic absolut ;**
- **schimbul de lucru mecanic tehnic ;**
- **schimbul de căldură.**

d) Verificarea calculelor pe baza bilanţului energetic. Diagrama Sankey ;

e) Randamentul termic al ciclului ;

f) Puterea teoretică dezvoltată de maşină dacă turaţia de lucru este $n_m = 200\ rot/\min$, iar un ciclu complet se execută în două rotaţii.

Rezolvare :

a) Valorile mărimilor de stare în punctele caracteristice ale ciclului sunt redate în tabelul 7.7. , iar reprezentarea grafică a celor trei procese este redată în fig. 7.7. (diagrama $p-V$).

Tabel 7.7.

S \ M	$p\ [bar]$	$V\ [dm^3]$	$T\ [K]$
1	10,00	212,50	573
2	2,05	743,80	411
3	7,18	212,50	411

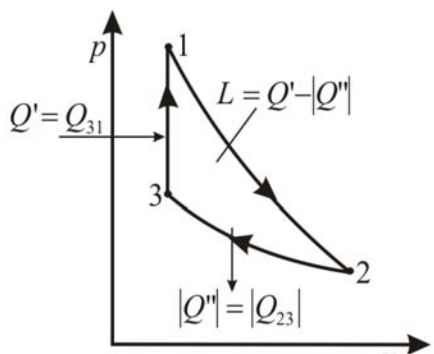


Fig. 7.7

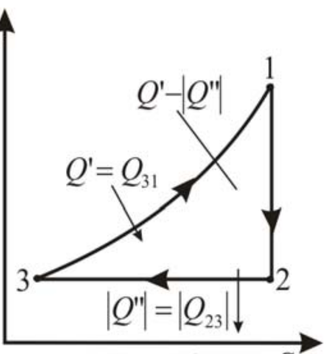


Fig. 7.8

Starea 1. Conform enunțului problemei avem :

$$p_1 = 10\ bar = 10 \cdot 10^5\ Pa$$

$$T_1 = t_1 + 273 = 300 + 273 = 573\ K$$

Volumul V_1 aferent stării 1 se determină astfel :

$$m_{am} = \nu \cdot M_{am} = \frac{V_N}{V_{N,M}} \cdot M_{am} = \frac{V_N}{V_{N,M}} \cdot \sum r_i \cdot M_i = \frac{V_N}{V_{N,M}} \cdot \left(r_{N_2} \cdot M_{N_2} + r_{CO_2} \cdot M_{CO_2} \right)$$

Adică : $$m = \frac{1}{22{,}414} \cdot (0{,}4 \cdot 28 + 0{,}6 \cdot 44) = 1{,}677\ kg$$

paranteza reprezentând masa molară aparentă a amestecului :

$$M_{am} = 37{,}6\ kg/kmol$$

Constanta amestecului este :

$$R_{am} = \frac{R_M}{M_{am}} = \frac{8314}{37{,}6} = 221{,}1\ J/kg \cdot K$$

În aceste condiții obținem :

$$V_1 = \frac{m_{am} \cdot R_{am} \cdot T_1}{p_1} = \frac{1{,}677 \cdot 22{,}1 \cdot 573}{10^6} = 0{,}2125\ m^3 = 212{,}5\ dm^3$$

Starea 2. Deoarece transformarea $1-2$ este o adiabată până la $V_2 = 3{,}5 \cdot V_1$, rezultă :

$$V_2 = 3{,}5 \cdot 212{,}5 = 743{,}8\ dm^3$$

$$p_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k_{am}} \cdot p_1$$

Coeficientul adiabatei k se determină astfel :

$$k_{am} = \frac{c_{p,am}}{c_{v,am}} = \frac{R_{am} + c_{v,am}}{c_{v,am}} = 1 + \frac{R_{am}}{c_{v,am}}$$

$$c_{v,am} = \sum g_i \cdot c_{vi} = g_{N_2} \cdot c_{v,N_2} + g_{CO_2} \cdot c_{v,CO_2}$$

în care : $c_{v,N_2} = 772{,}5 \ J/kg \cdot K$, $c_{v,CO_2} = 867{,}9 \ J/kg \cdot K$ la $300^\circ C$ (vezi anexa 14). Ca urmare :

$$c_{v,am} = 0{,}4 \cdot 772{,}5 + 0{,}6 \cdot 867{,}9 = 829{,}74 \ J/kg \cdot K$$

Iar exponentul adiabatic al amestecului este :

$$k_{am} = 1 + \frac{221{,}1}{829{,}74} = 1{,}266$$

Prin urmare : $p_2 = \left(\frac{212{,}5}{743{,}8}\right)^{1{,}266} \cdot 10 = 2{,}05 \ bar$

iar T_2 se obține astfel :

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k_{am}-1}{k_{am}}} = 573 \cdot \left(\frac{2{,}05}{10}\right)^{\frac{0{,}266}{1{,}266}} = 411 \ K$$

<u>Starea 3.</u> Întrucât $2-3$ este izotermă, rezultă :

$$T_3 = T_2 = 411 \ K$$

iar : $V_3 = V_1 = 212{,}5 \ dm^3$, din enunț

Atunci :

$$p_3 = \frac{V_2}{V_3} \cdot p_2 = \frac{743{,}8}{212{,}5} \cdot 2{,}05 = 7{,}18 \ bar$$

b) Variația mărimilor de stare analitice pe fiecare transformare:

<u>Variația de energie internă</u>

- pentru adiabata $1-2$

$$U_2 - U_1 = m_{am} \cdot c_{v,am} \cdot (T_2 - T_1) = 1{,}677 \cdot 829{,}74 \cdot (411 - 573) = -225419 \ J$$

- pentru izoterma $2-3$:

$U_3 - U_2 = 0$ (energia internă fiind o funcție dependentă numai de temperatură)

- pentru izocora $3-1$:

$$U_1 - U_3 = m_{am} \cdot c_{v,am} \cdot (T_1 - T_3) = 1{,}677 \cdot 829{,}74 \cdot (573 - 411) = -225419 \ J$$

Variația de entalpie

- pentru adiabata $1-2$:

$$H_2 - H_1 = k_{am} \cdot (U_2 - U_1) = -1{,}266 \cdot 225419 = -285380 \ J$$

- pentru izoterma $2-3$:

$$H_3 - H_2 = 0$$

- pentru izocora $3-1$:

$$H_1 - H_3 = k_{am} \cdot (U_1 - U_3) = +1{,}266 \cdot 225419 = 285380 \ J$$

Variația lucrului mecanic de dislocare

- pentru adiabata $1-2$:

$$L_{d_2} - L_{d_1} = p_2V_2 - p_1V_1 = 2{,}05 \cdot 10^5 \cdot 743{,}8 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^5 \cdot 212{,}5 \cdot 10^{-3} = = -60021 \ J$$

- pentru izoterma $2-3$:

$$L_{d_3} - L_{d_2} = p_3V_3 - p_2V_2 = 7{,}18 \cdot 10^5 \cdot 212{,}5 \cdot 10^{-3} - 2{,}05 \cdot 10^5 \cdot 743{,}8 \cdot 10^{-3} = 96 \ J$$

- pentru izocora $3-1$:

$$L_{d_1} - L_{d_3} = p_1V_1 - p_3V_3 = 10 \cdot 10^5 \cdot 212{,}5 \cdot 10^{-3} - 7{,}18 \cdot 10^5 \cdot 212{,}5 \cdot 10^{-3} = = 59925 \ J$$

Variația de entropie

- pentru adiabata $1-2$: $dS = \dfrac{\delta Q}{T} = 0$

$$S_2 - S_1 = 0$$

- pentru izoterma $2-3$: $dS = \dfrac{\delta Q}{T} = \dfrac{\delta L}{T}$

$$S_3 - S_2 = \frac{1}{T_{am}} \cdot \int_2^3 \delta L = \frac{1}{T_{am}} \cdot L_{12} = \frac{1}{T_{am}} \cdot m_{am} \cdot R_{am} \cdot T_{am} \cdot \ln\frac{V_3}{V_2} = m_{am} \cdot R_{am} \cdot \ln\frac{V_3}{V_2}$$

$$S_3 - S_2 = 1{,}677 \cdot 221{,}1 \cdot \ln\frac{212{,}5}{743{,}8} = -464{,}5 \ J/K$$

- pentru izocora $3-1$: $dS=\frac{\delta Q_v}{T}=\frac{m_{am}\cdot c_{c,am}\cdot dT}{T}$

$$S_1-S_3=\int_3^1 m_{am}\cdot c_{v,am}\cdot\frac{dT}{T}=m_{am}\cdot c_{v,am}\cdot\ln\frac{T_1}{T_3}$$

$$S_1-S_3=1{,}677\cdot 829{,}74\cdot\ln\frac{573}{411}=464{,}5\ \ J/K$$

Variațiile mărimilor de stare sunt prezentate sintetic în tabelul 7.8.

Tabelul 7.8.

Transformarea	$\Delta U\ [J]$	$\Delta H\ [J]$	$\Delta L_d\ [J]$	$\Delta S\ [J/K]$
$1-2$	-225.419	-285.380	-60.021	0
$2-3$	0	0	96	-464,5
$3-1$	225.419	285.380	59925	464,5
$\sum$	0	0	0	0

Reprezentarea ciclului în coordonate $T-S$ este redată în fig. 7.8.

c) Schimbările energetice cu exteriorul pentru fiecare transformare.

Schimbul de lucru mecanic absolut

- pentru adiabata $1-2$:

$$Q_{1-2}=0=(U_2-U_1)+L_{1-2}$$

rezultând :

$$L_{1-2}=-(U_2-U_1)=225419\ \ J$$

- pentru izoterma $2-3$:

$$L_{2-3}=m_{am}\cdot R_{am}\cdot T_2\cdot\ln\frac{V_3}{V_2}=1{,}667\cdot 221{,}1\cdot 411\cdot\ln\frac{212{,}5}{743{,}8}=-189783\ \ J$$

- pentru izocora $3-1$:

$$L_{3-1}=0$$

Schimbul de lucru mecanic tehnic

- pentru adiabata $1-2$. Se aplică ecuația primului principiu :

$$Q_{1-2}=0=(H_2-H_1)+L_{t_{1-2}}$$

din care rezultă :

$$L_{t_{1-2}}=-(H_2-H_1)=285380\ \ J$$

- pentru izoterma $2-3$:

$$L_{t_{2-3}} = -\int_2^3 V \cdot dp = -\int_2^3 m_{am} \cdot R_{am} \cdot T \cdot \frac{dp}{p} = m_{am} \cdot R_{am} \cdot T_2 \cdot \ln\frac{p_2}{p_3} = m_{am} \cdot R_{am} \cdot \ln\frac{V_3}{V_2} =$$

$$= L_{2-3} = -189790 \ J$$

ceea ce era de aşteptat (aria mărginită de graficul transformării, hiperbola echilateră, şi axa volumelor fiind identică cu cea mărginită de axa presiunilor).

- pentru izocora $3-1$:

$$L_{t_{3-1}} = -\int_3^1 V \cdot dp = V_3(p_3 - p_1) = -(L_{d_1} - L_{d_3}) = -59922 \ J$$

Schimbul de căldură

$$Q_{1-2} = 0$$

$$Q_{2-3} = L_{2-3} = -189780 \ J$$

$$Q_{3-1} = m_{am} \cdot c_{v,am} \cdot (T_1 - T_3) = (U_1 - U_3) = 225419 \ J$$

Rezultatele sunt prezentate sintetic în tabelul 7.9.

Tabelul 7.9.

Transformarea	L_{ij} $[J]$	$L_{t_{ij}}$ $[J]$	Q_{ij} $[J]$
$1-2$	225.419	285.380	0
$2-3$	-189.783	-189.783	-189.783
$3-1$	0	-59.925	225.419
$\sum$	35.636	35.636	35.636

d) Verificarea calculelor pe baza bilanțului energetic. Diagrama Sankey.

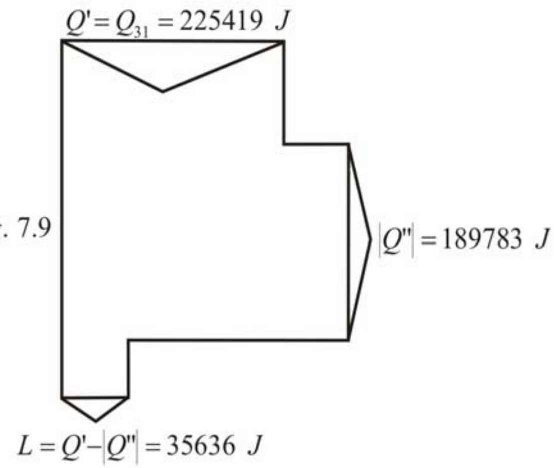


Fig. 7.9

$$L = L_{12} + L_{23} + L_{31} = 35636\ J/ciclu$$

$$L_t = L_{t_{12}} + L_{t_{23}} + L_{t_{31}} = 35636\ J/ciclu$$

Se observă că $L = L_t$ ceea ce era cunoscut pentru un ciclu.

$$L = L_t = Q' - |Q''| = Q_{31} - |Q_{23}| = 225419 - 189783 = 35636\ J$$

În fig. 7.9. este redată diagrama Sankey a ciclului.

e) Randamentul ciclului :

$$\eta_t = \frac{L}{Q'} = \frac{35636}{225419} = 0{,}158 = 15{,}8\%$$

f) Puterea teoretică dezvoltată de maşina termică la turația $n_m = 2000\ rot/\min$ ştiind că un ciclul se realizează în două rotații :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{n_m}{60} = \frac{1}{2} \cdot 35636 \cdot \frac{2000}{60} = 593933\ W = 593{,}933\ kW$$

7.2.5. Să se calculeze randamentul unei maşini termice care funcționează după ciclul Stirling compus din izotermele $T' = ct.$ şi $T'' = ct.$ şi izocorele $V = V_1$ şi $V = V_2$. Să se compare expresia găsită cu cea a randamentului ciclului Carnot care funcționează după aceleaşi temperaturi.

Rezolvare :

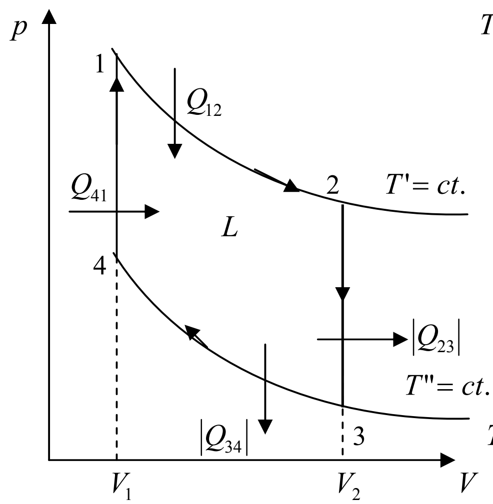


Fig. 7.10.

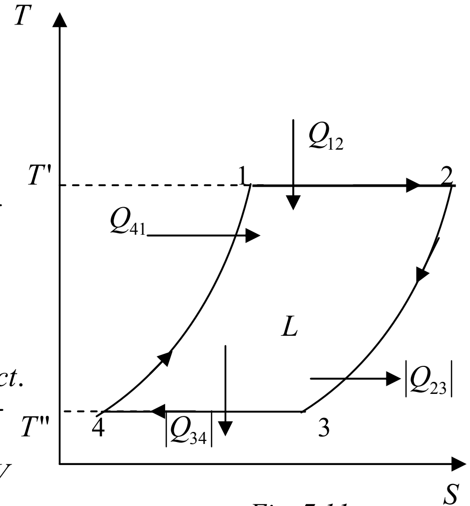


Fig. 7.11.

În fig. 7.10. şi 7.11. s-a reprezentat ciclul Stirling în diagramele $p - V$, respectiv $T - S$.

Conform relației (7.6.) randamentul termic al ciclului direct este :

$$\eta_{tS} = \frac{L}{Q'} = \frac{Q' - |Q''|}{Q'} = 1 - \frac{|Q''|}{Q'}$$

unde : Q' este căldura primită de la sursa caldă :

$$Q' = Q_{12} + Q_{41}$$

Q'' este căldura cedată sursei reci :

$$Q'' = Q_{23} + Q_{34}$$

- transformarea $1 - 2$ izotermă :

$$Q_{12} = L_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = m \cdot R \cdot T' \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

- transformarea $2-3$ izocoră :

$$L_{23}=0$$

$$Q_{23}=U_3-U_2=m\cdot c_v\cdot\left(T''-T'\right)$$

- transformarea $3-4$ izotermă

$$Q_{34}=L_{34}=\int_{V_2}^{V_1}p\cdot dV=m\cdot R\cdot T''\cdot\ln\frac{V}{V_2}$$

- transformarea $4-1$ izocoră :

$$Q_{41}=U_1-U_4=m\cdot c_v\cdot\left(T'-T''\right)$$

Înlocuind expresiile obținute pentru căldura primită , respectiv cedată, rezultă :

$$\eta_{ts}=\frac{Q_{12}+Q_{41}-\left|Q_{23}+Q_{34}\right|}{Q_{12}+Q_{41}}=$$

$$=\frac{m\cdot R\cdot T'\cdot\ln\frac{V_2}{V_1}+m\cdot c_v\cdot\left(T'-T''\right)-m\cdot c_v\cdot\left(T'-T''\right)-m\cdot R\cdot T''\cdot\ln\frac{V_2}{V_1}}{m\cdot R\cdot T'\cdot\ln\frac{V_2}{V_1}+m\cdot c_v\cdot\left(T'-T''\right)}==$$

$$=\frac{m\cdot R\cdot\left(T'-T''\right)\cdot\ln\frac{V_2}{V_1}}{m\cdot R\cdot T'\cdot\left(\ln\frac{V_2}{V_1}+\frac{1}{k-1}\cdot\frac{T'-T''}{T'}\right)}=\frac{T'-T''}{T'}\cdot\frac{\ln\frac{V_2}{V_1}}{\ln\frac{V_2}{V_1}+\frac{1}{k-1}\cdot\frac{T'-T''}{T'}}$$

Expresia randamentului ciclului Carnot direct (7.12.) :

$$\eta_{tc}=1-\frac{T''}{T'}=\frac{T'-T''}{T'}$$

Deci : $\eta_{ts}=\eta_{tc}\cdot A$

unde : $A=\dfrac{\ln\frac{V_2}{V_1}}{\ln\frac{V_2}{V_1}+\frac{1}{k-1}\cdot\frac{T'-T''}{T'}}<1$. Deci : $\eta_{ts}<\eta_{tc}$.

7.2.6. Un motor termic funcționează după un ciclu Carnot reversibil. Agentul termic este aer, având un debit masic $\dot{m}=0,3\ kg/s$ şi primeşte de la sursa de temperatură $T'=700\ K$ un flux termic $\dot{Q}'=50000\ W$.

Temperatura sursei reci este $T''=400\ K$. Presiunea maximă pe ciclu este $p_1=15\ bar$.

Se cere :

a) **Să se reprezinte ciclul în diagramele $p-\dot{V}$ şi $T-\dot{S}$ şi să se calculeze parametrii termici de stare în punctele caracteristice ale ciclului ; $k=1{,}4$.**

b) **Randamentul termic al ciclului ;**

c) **Puterea dezvoltată de motor ;**

d) **Fluxul termic cedat sursei de temperatura T''.**

Rezolvare :

a) Reprezentarea ciclului Carnot în diagramele $p-\dot{V}$ şi $T-\dot{S}$ este dată în figurile 7.12. şi 7.13.

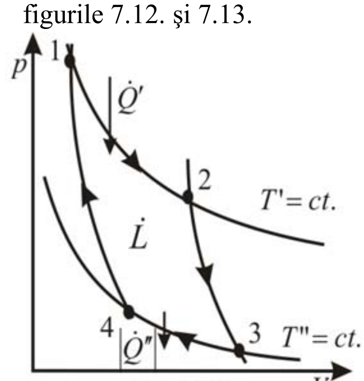


Fig. 7.12

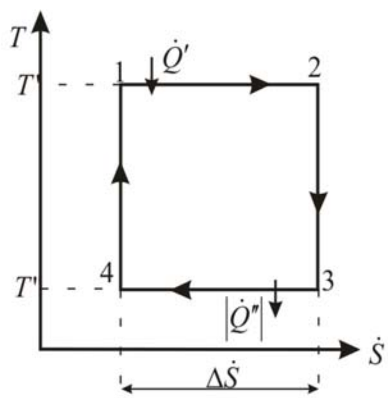


Fig. 7.13

Starea 1. $\dot{V}_1=\dfrac{\dot{m}\cdot R\cdot T_1}{p_1}=\dfrac{0{,}3\cdot 8314\cdot 700}{29\cdot 15\cdot 10^5}=0{,}04\ m^3/s$

Starea 2. Din relația fluxului termic $\dot{Q}'$ se obține :

$$\dot{Q}'=\dot{Q}_{12}=p_1\cdot\dot{V}_1\cdot\ln\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1}$$

$$\dot{V}_2=\dot{V}_1\cdot\exp\frac{\dot{Q}'}{p_1\cdot\dot{V}_1}=0{,}04\cdot\exp\frac{50000}{15\cdot 10^5\cdot 0{,}04}=0{,}092\ m^3/s$$

Transformarea $1-2$ izotermă, deci presiunea p_2 se obține din relația :

$$p_1\cdot\dot{V}_1=p_2\cdot\dot{V}_2$$

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = 15 \cdot \frac{0{,}04}{0{,}092} = 6{,}5\ bar$$

Starea 3. Transformarea $2-3$ este adiabată, deci :

$$T_2 \cdot \dot{V}_2^{k-1} = T_3 \cdot \dot{V}_3^{k-1}$$

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 \cdot \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{1}{k-1}} = 0{,}092 \cdot \left(\frac{700}{400}\right)^{\frac{1}{1{,}4-1}} = 0{,}373\ m^3/s$$

$$p_2 \cdot \dot{V}_2^k = p_3 \cdot \dot{V}_3^k$$

$$p_3 = p_2 \cdot \left(\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_3}\right)^k = 6{,}5 \cdot \left(\frac{0{,}092}{0{,}373}\right)^{1{,}4} = 0{,}9\ bar$$

Starea 4. Transformarea $4-1$ este adiabată, deci :

$$T_1 \cdot \dot{V}_1^{k-1} = T_4 \cdot \dot{V}_4^{k-i}$$

$$\dot{V}_4 = \dot{V}_1 \cdot \left(\frac{T_1}{T_4}\right)^{\frac{1}{k-1}} = 0{,}04 \cdot \left(\frac{700}{400}\right)^{\frac{1}{1{,}4-1}} = 0{,}162\ m^3/s$$

Transformarea $3-4$ este izotermă, deci :

$$p_3 \cdot \dot{V}_{31} = p_4 \cdot \dot{V}_4$$

$$p_4 = p_3 \cdot \frac{\dot{V}_3}{\dot{V}_4} = 0{,}9 \cdot \frac{0{,}373}{0{,}162} = 2{,}07\ bar$$

Valorile parametrilor termici de stare sunt centralizate în tabelul 7.10.

Tabelul 7.10.

M / S	$p\ [bar]$	$\dot{V}\ [m^3/s]$	$T\ [K]$
1	15,00	0,040	700
2	6,50	0,092	700
3	0,90	0,373	400
4	2,07	0,162	400

b) Randamentul termic al ciclului Carnot este dat de relația (7.12.) :

$$\eta_c = \frac{\dot{L}}{\dot{Q}'} = \frac{\dot{Q}' - |\dot{Q}''|}{\dot{Q}'} = 1 - \frac{|\dot{Q}''|}{\dot{Q}'} = 1 - \frac{T''}{T'} = 1 - \frac{400}{700} = 42{,}86\%$$

c) Puterea dezvoltată de motor :

$$P = \dot{L} = \eta_c \cdot \dot{Q}' = 0{,}4286 \cdot 50000 = 21428\ W = 21{,}43\ kW = 29{,}1\ CP$$

d) Fluxul termic cedat sursei reci se poate obține din ecuația de bilanț :

$$\dot{Q}' = \dot{L} + \left|\dot{Q}''\right|$$

$$\left|\dot{Q}''\right| = \dot{Q}' - \dot{L} = 50000 - 21428 = 28572\ W = 28{,}57\ kW$$

7.2.7. O instalație frigorifică funcționează după un ciclu Carnot reversibil, inversat. Puterea frigorifică a instalației (fluxul de căldură) $\dot{Q}'' = 500\ W$. Temperatura sursei reci este $T'' = 255\ K$. Temperatura sursei calde $T' = 300\ K$.

Se cere :

a) Să se reprezinte ciclul Carnot reversibil inversat în diagrama $p - V$ și $T - \dot{S}$;
b) Eficiența frigorifică ;
c) Puterea consumată pentru antrenarea instalației ;
d) Fluxul termic cedat sursei calde (mediului ambiant).

Rezolvare :

a) În fig. 7.14. este reprezentat ciclul Carnot inversat în diagrama $p - V$, iar în fig. 7.15. este reprezentat ciclul Carnot inversat în diagrama $T - \dot{S}$.

- fluxul termic $\dot{Q}''$, preluat de agentul de lucru de la sursa de temperatură T'' :

$$\dot{Q}'' = \dot{Q}_{23} = T'' \cdot \Delta\dot{S} = aria\ 23ba$$

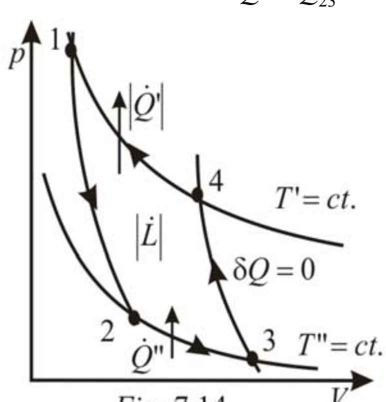


Fig. 7.14

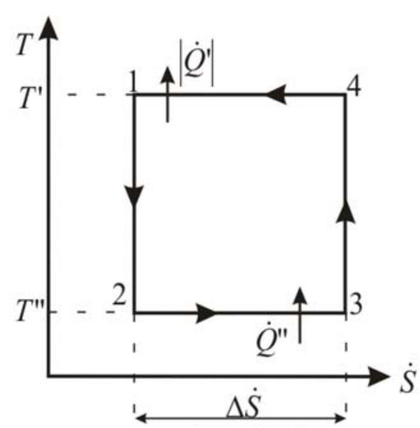


Fig. 7.15

- fluxul termic cedat sursei de temperatură T' :

$$\left|\dot{Q}'\right| = \left|\dot{Q}_{41}\right| = T' \cdot \left|\Delta\dot{S}\right| = aria\ 41ab$$

- bilanțul termic al cilcului este :

$$\dot{Q}'' + \left|\dot{L}\right| = \left|\dot{Q}'\right|$$

Deci : $\left|\dot{L}\right| = \left|\dot{Q}'\right| - \dot{Q}'' = (T' - T'') \cdot \left|\Delta\dot{S}\right| = aria\ 1234$

b) Eficiența frigorifică este definită prin relația (7.13.) :

$$\varepsilon_{f_c} = \frac{efectul\ util}{efectul\ consumat} = \frac{\dot{Q}''}{\dot{L}} = \frac{T'' \cdot \Delta\dot{S}}{(T' - T'') \cdot \Delta\dot{S}} = \frac{T''}{T' - T''}$$

Valoarea numerică a eficienței frigorifice este :

$$\varepsilon_{f_c} = \frac{255}{300 - 255} = 5{,}67$$

c) Puterea necesară antrenării instalației :

$$P = \left|\dot{L}\right| = \frac{\dot{Q}''}{\varepsilon_f} = \frac{500}{5{,}67} = 88{,}18\ W$$

d) Fluxul termic cedat sursei de temperatură T' :

$$\left|\dot{Q}'\right| = \left|\dot{L}\right| + \dot{Q}'' = 88{,}18 + 500 = 588{,}18\ W$$

7.2.8. O instalație de pompă termică funcționează după un ciclu Carnot reversibil inversat. Instalația trebuie să furnizeze pentru termoficare un flux termic $\dot{Q}' = 10\ MW$, la temperatura $T' = 330\ K$. Agentul de lucru care evoluează în instalație preia căldură de la un izvor termal cu temperatura $T'' = 300\ K$.

Se cere :

a) Să se reprezinte ciclul Carnot reversibil inversat în diagramele $p - V$ și $T - \dot{S}$;
b) Eficiența termică a instalației ;
c) Puterea consumată pentru antrenarea instalației ;
d) Fluxul termic preluat de la sursa de temperatură.

Rezolvare :

a) În figurile 7.16. și 7.17. este reprezentat ciclul Carnot reversibil inversat în coordonatele $p - V$, respectiv $T - \dot{S}$.

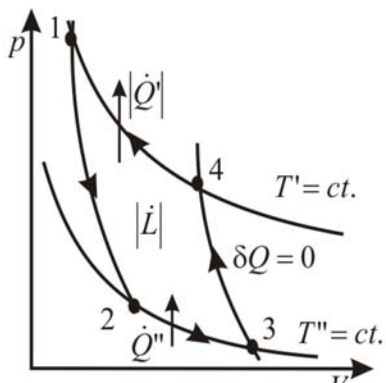


Fig. 7.16.

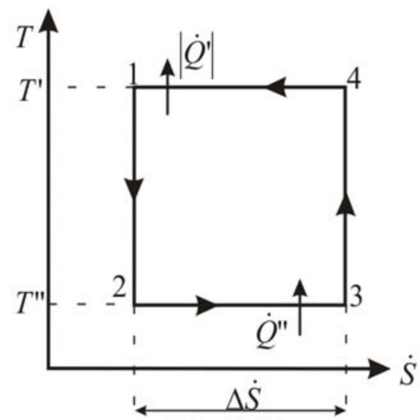


Fig. 7.17.

Prin ciclul reversibil se înțelege un ciclul compus dintr-o succesiune de transformări reversibile ; temperatura sursei cu care schimbă căldura agentul de lucru, se consideră egală cu temperatura agentului.

- fluxul termic primit de la sursa de temperatură T'' :

$$\dot{Q}''=\dot{Q}_{23}=T''\cdot\Delta\dot{S}=aria\ 23ba$$

- fluxul termic cedat instalației de termoficare la temperatura T' este :

$$\left|\dot{Q}'\right|=\left|\dot{Q}_{41}\right|=T'\cdot\left|\Delta\dot{S}\right|=aria\ 41ab$$

- bilanțul termic al cilcului este :

$$\dot{Q}''+\left|\dot{L}\right|=\left|\dot{Q}'\right|$$

Deci : $\left|\dot{L}\right|=\left|\dot{Q}'\right|-\dot{Q}''=\left(T'-T''\right)\cdot\left|\Delta\dot{S}\right|=aria\ 1234$

b) Eficiența termică a instalației este definită prin relația (7.14.) :

$$\mu_c=\frac{efectul\ util}{efectul\ consumat}=\frac{\left|\dot{Q}'\right|}{\left|\dot{L}\right|}=\frac{T'\cdot\left|\Delta\dot{S}\right|}{\left(T'-T''\right)\cdot\left|\Delta\dot{S}\right|}=\frac{T'}{T'-T''}$$

$$\mu_c=\frac{330}{330-300}=11$$

c) Puterea necesară antrenării instalației :

$$P=\left|\dot{L}\right|=\frac{\left|\dot{Q}'\right|}{\varepsilon_t}=\frac{10}{11}=0{,}91\ MW$$

d) Fluxul termic $\dot{Q}''$:

$$\dot{Q}''=\left|\dot{Q}'\right|-\left|\dot{L}\right|=10-0{,}91=9{,}09\ MW$$

7.2.9. O masă m = 2 kg de CO_2 suferă o succesiune de transformări termodinamice care constituie ciclul descris în fig. 7.18.

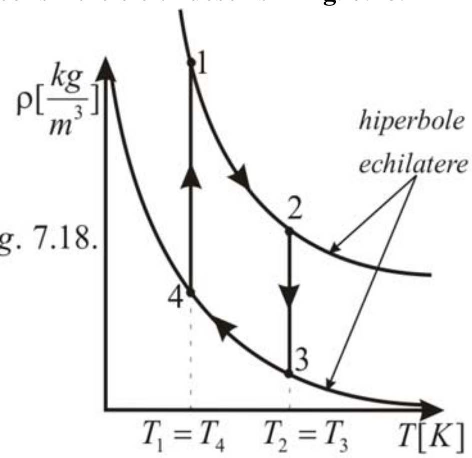


Fig. 7.18.

Se cere:

a) Să se reprezinte ciclul în diagrama *p – V*. Justificare.

b) Să se calculeze parametrii termici de stare din punctele caracteristice care lipsesc din tabelul 7.11.

Tab. 11

Stare	p [bar]	V[dm^3]	T[K]
1	6	V_1	300
2			600
3		$2 \cdot V_2$	
4			

c) Variațiile mărimilor de stare analitice pe fiecare transformare. Să se reprezinte ciclul în diagrama *T – S*.

d) Schimburile energetice cu exteriorul pe fiecare transformare.

e) Verificarea calculelor pe baza bilanțului energetic. Diagrama Sankey.

f) Randamentul termic al ciclului.

Căldurile specifice se consideră constante cu temperatura.

Rezolvare:

a) Pentru a preciza natura proceselor 1-2; 3-4 se au în vedere:

- ecuația de stare a gazului:

$$p = \rho R T$$

- ecuația hiperbolei echilatere:

$\rho T = \alpha = constant$ (vezi fig. 7.18)

Comparând cele două ecuații se deduce:

$$\alpha = \frac{p}{R} = constant$$

Ceea ce înseamnă p = *constant,* adică 1-2 respectiv 3-4 sunt procese izobare.

Procesele 1-4 respectiv 2-3 sunt (vezi fig. 7.18) izoterme.

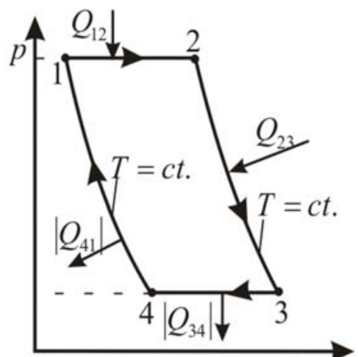


Fig. 7.19.

b) Pentru starea 1, volumul se calculează astfel:

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{2 \cdot 188{,}778 \cdot 300}{6 \cdot 10^5} = 188{,}778 \ dm^3$$

unde, pentru CO_2, *R = 188,778 J/kgK* extras din anexa 11.

Pentru starea 2, volumul se calculează din ecuația izobarei 1-2:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = V_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 188{,}778 \cdot \frac{600}{300} = 377{,}556 \ dm^3$$

Pentru starea 3, presiunea se calculează din ecuația izotermei 2-3:

$$p_2V_2 = p_3V_3 \Rightarrow p_3 = p_2 \cdot \frac{V_2}{V_3} = p_2 \cdot \frac{V_2}{2 \cdot V_2} = \frac{p_2}{2} = \frac{6}{2} = 3 \ bar$$

Cum 3-4 este un proces izobar, $p_3 = p_4$, iar volumul V_4 se calculează din ecuația ce descrie acest proces:

$$\frac{V_3}{T_3} = \frac{V_4}{T_4} \Rightarrow V_4 = V_3 \cdot \frac{T_4}{T_3} = 755{,}112 \cdot \frac{300}{600} =$$

$$= 377{,}556 \ dm^3$$

Tab. 11 bis

Stare	p [bar]	V[dm^3]	T[K]
1	*6*	V_1=188,788	*300*
2	$p_2 = 6$	V_2=377,556	*600*
3	$P_3 = 3$	$V_3 = 2 \cdot V_2 = 755{,}112$	$T_3 = 600$
4	$P_4 = 3$	*V4=377,556*	$T_4 = 300$

c) Valorile calculate pentru variațiile mărimilor de stare (analitice) sunt trecute în tab. 7.12.

Tab. 7.12

Transf.	$\Delta U\ [kJ]$	$\Delta H\ [kJ]$	$\Delta L_d\ [kJ]$	$\Delta S\ [J/K]$
1-2	365,376	478,643	113266,8	1105,9
2-3	0	0	0	261,7
3-4	-365,376	-478,643	-113266,8	-1105,9
4-1	0	0	0	-261,7
Σ	0	0	0	0

Pentru transformarea izobară 1-2:

$$\Delta U = mc_v\Delta T = m \cdot \frac{R}{k-1}(T_2 - T_1) = 2\frac{188{,}778}{1{,}31-1}(600-300) =$$

$$= 1217{,}923 \cdot 300 = 365{,}376\ \ KJ$$

(k = 1,31 extras din anexa 11)

$$\Delta H = k\Delta U = 1{,}31 \cdot 365{,}376 = 478{,}643\ \ kJ$$

$$\Delta L_d = p_2V_2 - p_1V_1 = 6 \cdot 10^5(377{,}556 - 188{,}778) = 113266{,}8\ \ kJ$$

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 mc_p \frac{dT}{T} = mc_p \int_1^2 \frac{dT}{T} = mc_p \ln\frac{T_2}{T_1} =$$

$$= m\frac{kR}{k-1}\ln\frac{T_2}{T_1} = 2 \cdot \frac{188{,}778 \cdot 1{,}31}{1{,}31-1}\ln\frac{600}{300} = 1105{,}9\ \ J/K$$

Pentru transformarea izotermă 2-3:

$$\Delta U = 0$$

$$\Delta H = 0$$

$$\Delta L_d = p_3V_3 - p_2V_2 = mRT_3 - mRT_2 = mR\Delta T = 0$$

$$\Delta S = \int_2^3 \frac{\delta Q}{T} = \int_2^3 \frac{p_2V_2}{T_2} \cdot \frac{dV}{V} = \frac{p_2V_2}{T_2} \ln \frac{V_3}{V_2} = mR \ln \frac{p_2}{p_3} = 2 \cdot 188{,}778 \cdot \ln 2$$

$$= 261{,}7 \ \ J/K$$

Pentru transformarea izobară 3-4:

$$\Delta U = mc_v \Delta T = m \cdot \frac{R}{k-1}(T_4 - T_3) = 2\frac{188{,}778}{1{,}31-1}(300-600) =$$

$$= -365{,}376 \ \ KJ$$

$$\Delta H = k\Delta U = -1{,}31 \cdot 365{,}376 = -478{,}643 \ \ kJ$$

$$\Delta L_d = p_4V_4 - p_3V_3 = 3 \cdot 10^5 (377{,}556 - 755{,}112) = -113266{,}8 \ \ kJ$$

$$\Delta S = \int_3^4 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 mc_p \frac{dT}{T} = mc_p \ln \frac{T_4}{T_3} = m\frac{kR}{k-1} \ln \frac{T_4}{T_3} =$$

$$= 2 \cdot \frac{1{,}31 \cdot 188{,}778}{1{,}31-1} \ln \frac{300}{600} = -1105{,}9 \ \ J/K$$

Pentru transformarea izotermă 4-1:

$$\Delta U = 0$$

$$\Delta H = 0$$

$$\Delta L_d = 0$$

$$\Delta S = \int_4^1 \frac{\delta Q}{T} = \int_4^1 mR \cdot \frac{dV}{V} = mR \ln \frac{V_1}{V_4} = mR \ln \frac{p_4}{p_1} =$$

$$= 2 \cdot 188{,}788 \cdot \ln \frac{3}{6} = -261{,}7 \ \ J/K$$

În fig. 7.20 este prezentat ciclul în diagrama *T – S*.

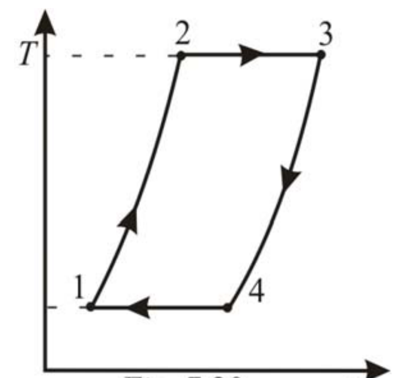


Fig. 7.20.

d) Valorile calculate pentru schimburile energetice cu exteriorul sunt înscrise în tab. 7.13.

Tab. 7.13

Transf.	Q_{ij} $[kJ]$	L_{ij} $[kJ]$	$L_{t\,ij}$ $[kJ]$
1-2	478,643	113266,8	0
2-3	157,021	157,021	157,021
3-4	-478,643	-113266,8	0
4-1	-78,511	-78,511	-78,511
Σ	78,511	78,511	78,511

Pentru transformarea izobară 1-2:

$$Q_{12} = mc_p \Delta T = m\frac{kR}{k-1}(T_2 - T_1) = \Delta H = 478{,}643\ kJ$$

$$L_{12} = \int_1^2 pdV = p_1(V_2 - V_1) = \Delta L_d = 113266{,}8\ kJ$$

$$L_{t_{12}} = -\int_1^2 Vdp = 0$$

Pentru transformarea izotermă 2-3:

$$Q_{23} = L_{23} = L_{t_{23}} = mRT_2 \ln\frac{p_2}{p_3} = 2\cdot 188{,}778\cdot 600 \ln\frac{6}{3} =$$

$$= 157{,}021\ kJ$$

Pentru transformarea izobară 3-4

$$Q_{34} = mc_p\Delta T = \Delta H = -478{,}643\ kJ$$
$$L_{34} = \Delta L_d = -113266{,}8\ kJ$$
$$L_{t_{34}} = 0$$

Pentru transformarea izotermă 4-1:

$$Q_{41} = L_{41} = L_{t_{41}} = mRT_1 \ln\frac{p_4}{p_1} = 2\cdot 188{,}778\cdot 300 \ln\frac{3}{6} =$$
$$= -78{,}511\ kJ$$

e)

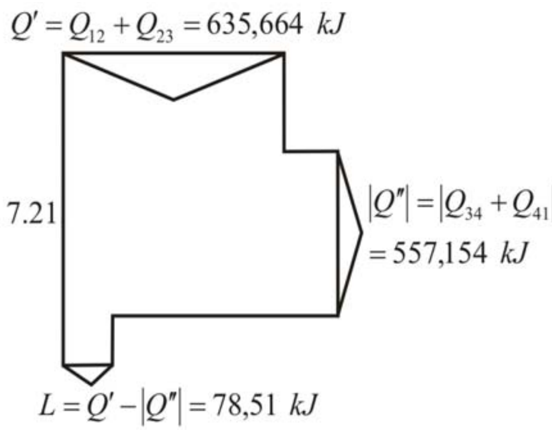


Fig. 7.21

În figura 7.21 este redată diagrama Sankey a ciclului.

f) Randamentul ciclului este:

$$\eta_T = \frac{L}{Q'} = \frac{78{,}51}{653{,}664} = 0{,}12 = 12\ \%$$

7.3. Probleme propuse

7.3.1. O maşină termică care funcționează după ciclul Carnot, are drept agent de lucru aerul. La începutul transformării izoterme cu aport de căldură, parametrii aerului sunt : $p_1 = 18\ bar$, $T_1 = 1000\ K$, iar la sfârşitul acestei transformări avem : $p_2 = 6\ bar$. Se consideră că în ciclu evoluează $1\ kg$ aer.

Se cere :

a) Randamentul termic al ciclului, dacă la sfârşitul destinderii adiabate presiunea aerului este de $1{,}2\ bar$;

b) Lucrul mecanic produs pe ciclu şi căldura cedată sursei reci.

R : a) $\eta_{TC} = 36{,}8\%$;

b) $l_C = 116{,}25\ \ kg/kg \cdot ciclu$

$|q''| = 199{,}1\ \ kg/kg \cdot ciclu$

7.3.2. Să se determine ecuaţia entropiei în amestecarea reversibilă, izotermă a $5\ kg$ clorură de metil cu $2\ kg$ hidrogen, dacă amestecul ocupă la presiunea de $2\ bar$ un volum de $17\ m^3$. Se dă $R_{CH_3Cl} = 165\ \ J/kg \cdot K$.

R : $\Delta S = 2{,}8\ \ kJ/K$

7.3.3. Un debit de $4500\ \ m_N^3/h$ de azot aflat la presiunea de $1\ bar$ şi temperatura de $25^\circ C$ efectuează un ciclul termodinamic format din următoarele transformări succesive :

- o comprimare adiabată până ce presiunea creşte de 5 ori ;
- o încălzire izobară până ce temperatura creşte de 3,5 ori faţă de starea iniţială ;
- o destindere adiabată până la presiunea iniţială ;
- o răcire izobară până la starea iniţială.

Se cer :

a) Puterea teoretică furnizată de maşina termică ce lucrează după acest ciclu ;

b) Randamentul termic teoretic al ciclului.

R : a) $P_t = 346{,}7\ \ kW$

b) $\eta_t = 0{,}369$

7.4. Teste grilă

- *Timp de lucru: 40 min.*
- *Fiecare întrebare se punctează cu 0,6 puncte.*
- *Un punct din oficiu.*

1) Care dintre următoarele relaţii sunt adevărate pentru un ciclu termodinamic generalizat direct:

a) $\eta_T = \dfrac{L}{Q'}$; b) $\eta_T = \dfrac{Q' + |Q''|}{Q'}$; c) $\eta_T = \dfrac{Q' + Q''}{Q'}$;

d) $\eta_T = 1 - \dfrac{|Q''|}{Q'}$; e) $\eta_T = 1 + \dfrac{Q''}{Q'}$; f) $\eta_T = 1 - \dfrac{T''}{T'}$;

2) Care dintre următoarele relații sunt adevărate pentru un ciclu Carnot direct:

a) $\eta_c = \dfrac{L}{Q'}$; b) $\eta_c = \dfrac{T' - T''}{T'}$; c) $\eta_c = 1 - \dfrac{T''}{T'}$;

d) $\eta_c = \dfrac{Q' - |Q''|}{Q'}$; e) $\eta_c = \dfrac{Q' + Q''}{Q'}$; f) $\eta_c = 1 + \dfrac{Q''}{Q'}$;

3) Care dintre următoarele relații sunt adevărate pentru un ciclu termodinamic specific instalațiilor frigorifice:

a) $\varepsilon_f = \dfrac{Q''}{|L|} = \dfrac{Q''}{|Q'| - Q''}$; b) $\varepsilon_f = \dfrac{Q''}{|Q' - Q''|}$;

c) $\varepsilon_f = \dfrac{Q''}{Q' - |Q''|}$; d) $\varepsilon_f = \dfrac{|Q''|}{Q' - |Q''|}$;

4) Care dintre următoarele relații sunt adevărate pentru o maşină frigorifică ce funcționează după un ciclu Carnot inversat:

a) $\varepsilon_f = \dfrac{T'}{T' - T''}$; b) $\varepsilon_f = \dfrac{T''}{T' - T''}$;

c) $\varepsilon_f = \dfrac{Q''}{|L|}$; d) $\varepsilon_f >< 1$

5) Care relații sunt adevărate pentru o pompă de căldură:

a) $\mu = \dfrac{Q'' - |Q'|}{L}$; b) $\mu = \dfrac{Q'' - Q'}{|L|}$; c) $\mu = \dfrac{|Q'|}{L}$;

d) $\mu = \dfrac{|Q'|}{|Q'| - Q''}$; e) $\mu > 1$; f) $\mu \le 1$.

6) Care relații sunt adevărate pentru o pompă de căldură ce funcționează după un ciclu Carnot inversat:

a) $\mu = \dfrac{T'}{T'-T''}$; b) $\mu = \dfrac{T''}{T'-T''}$; c) $\mu = \dfrac{T'-T''}{T'+T''}$; d) $\mu \geq 1$.

7) Care relații sunt adevărate pentru o instalație mixtă care funcționează după un ciclu termodinamic generalizat inversat:

a) $\varphi = \dfrac{Q''+|Q'|}{|L|}$; b) $\varphi = \dfrac{Q''-Q'}{|L|}$; c) $\varphi = \dfrac{Q''-Q'}{|Q'|-Q''}$;

d) $\varphi = \dfrac{|Q'|+Q''}{|Q'|-Q''}$; e) $\varphi \leq 1$; f) $\varphi > 1$.

8) Care relații sunt adevărate pentru o instalație mixtă ce funcționează după ciclul Carnot inversat:

a) $\varphi_c = \dfrac{T''+T'}{T''-T'}$; b) $\varphi_c = \dfrac{T'+T''}{T'-T''}$; c) $\varphi_c = 1+2\dfrac{T''}{T'-T''}$;

d) $\varphi_c = \dfrac{|Q'|+Q''}{|Q'|-Q''} = \dfrac{T'+T''}{T'-T''}$; e) $\varphi_c \leq 1$; f) $\varphi_c > 1$.

9) Care dintre relațiile de mai jos sunt adevărate pentru un proces termodinamic reversibil:

a) $dS = \dfrac{\delta Q}{T}$; b) $[S] = \dfrac{J}{K}$; c) $[S] = \dfrac{J}{kg \cdot K}$;

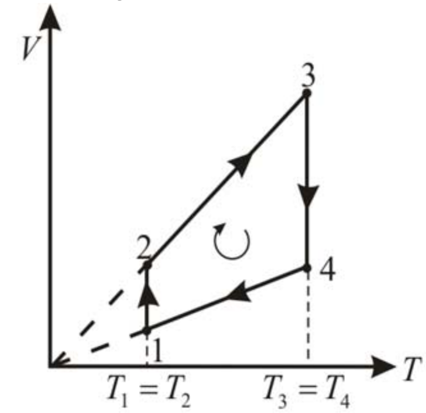
d) $dS \geq \dfrac{dU + \delta L}{T}$; e) $dS = \dfrac{dH + \delta L}{T}$; d) $dS = \dfrac{dH + \delta L_t}{T}$.

10) Care dintre relațiile de mai jos sunt adevărate pentru un proces termodinamic ireversibil:

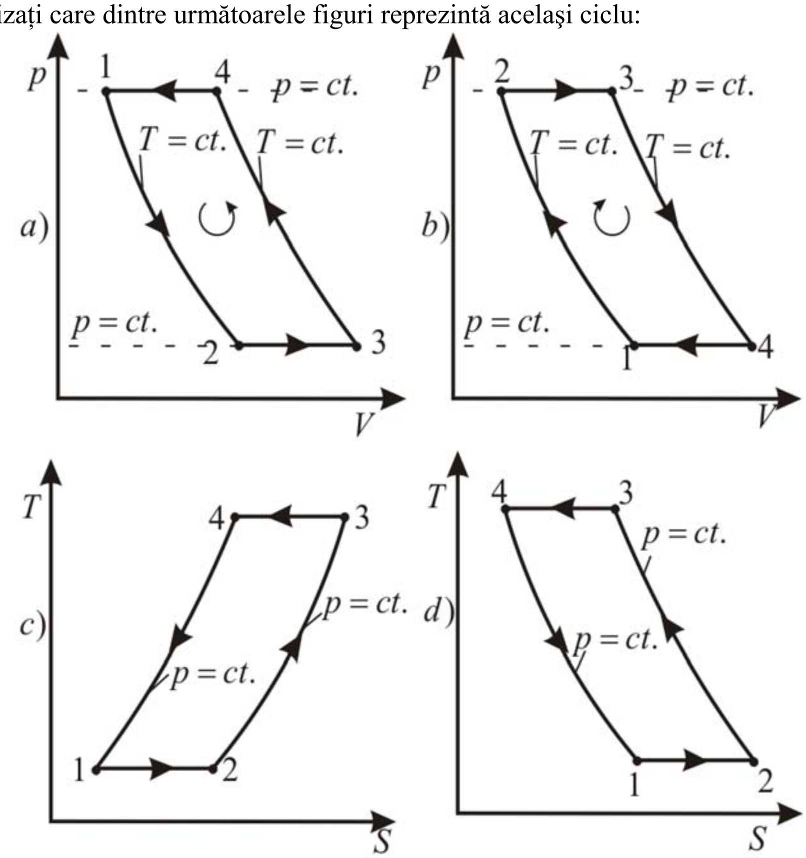
a) $dS = \dfrac{\delta Q}{T}$; b) $dS \geq \dfrac{\delta Q}{T}$; c) $dS > \dfrac{\delta Q}{T}$;

d) $dS > \dfrac{dU + \delta L}{T}$; e) $\Delta S < \int_1^2 \dfrac{\delta Q}{T}$; f) $\Delta S > \int_1^2 \dfrac{\delta Q}{T}$.

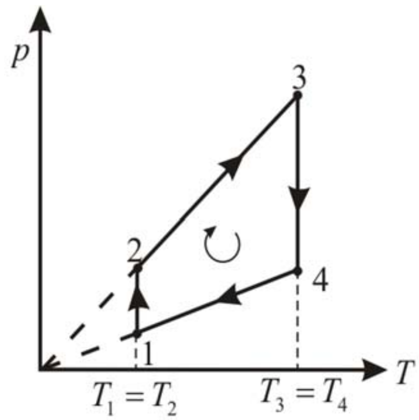
11) Se dă ciclul reprezentat în figura alăturată:

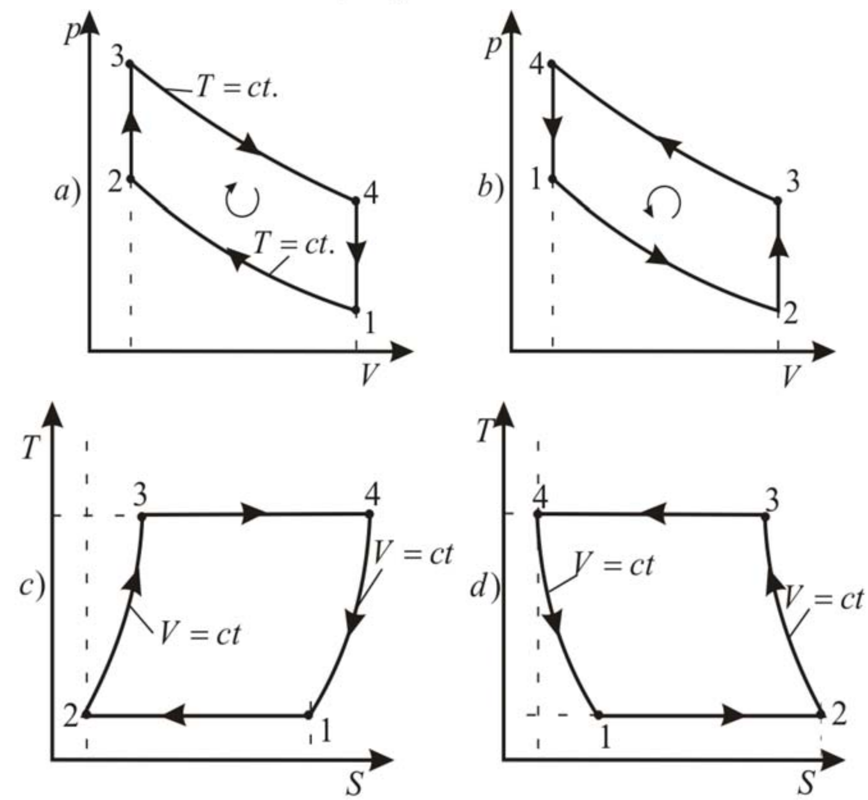


Precizați care dintre următoarele figuri reprezintă acelaşi ciclu:

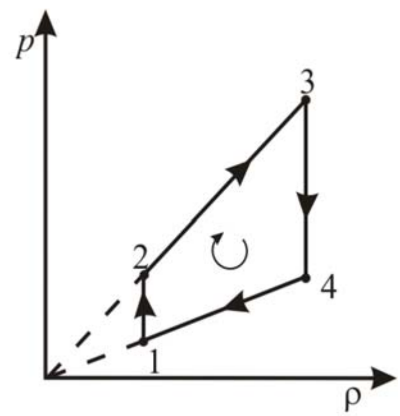


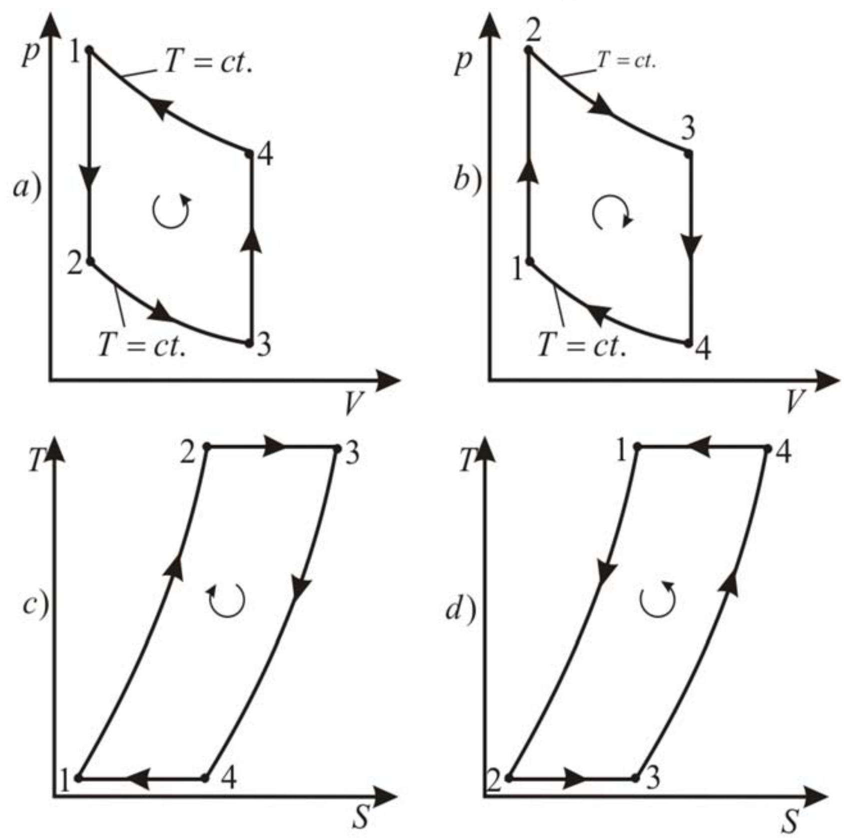
12) Se dă ciclul din figura alăturată. Precizați care din următoarele figuri reprezintă acelaşi ciclu.





13) Se dă ciclul din figura alăturată. Precizați care din următoarele figuri reprezintă acelaşi ciclu.





14) Care dintre următoarele relații sunt adevărate pentru un proces reversibil izocor:

a) $dS = \frac{dU}{T}$;

b) dS = 0;

c) $dS = \frac{dH}{T}$;

d) $\Delta S = m\frac{R_M}{M}\frac{1}{k-1}\int_1^2 \frac{dT}{T}$;

e) $\Delta S = mc_v \ln\frac{T_2}{T_1}$;

f) $\Delta S = m\frac{R}{k-1}\ln\frac{p_2}{p_1}$.

15) Care dintre următoarele relații sunt adevărate pentru un proces reversibil izobar:

a) dS = 0;

b) $dS = \frac{dH}{T}$;

c) $dS = \frac{dU}{T}$;

d) $\Delta S = mR\frac{k}{k-1}\ln\frac{T_2}{T_1}$;

e) $\Delta S = mc_p \ln\frac{V_2}{V_1}$;

f) $\Delta S = \frac{L_{t_{12}}}{T}$.

CAPITOLUL 8

GAZE REALE

8.1. Relații de calcul

a) Ecuații de stare a gazelor reale, de tip „van der Waals” :

$$\left(p+\frac{a}{v^2}\right)\cdot(v-b)=R\cdot T \qquad (8.1.)$$

în care constantele a şi b se exprimă în funcție de parametrii critici p_{cr}, v_{cr} şi T_{cr} precizați în anexa 22 pentru diferite gaze.

$$a=3\cdot p_{cr}\cdot v_{cr}^2 \qquad (8.2.)$$

$$b=\frac{v_{cr}}{3} \qquad (8.3.)$$

$$R=\frac{8}{3}\cdot\frac{p_{cr}\cdot v_{cr}}{T_{cr}} \qquad (8.4.)$$

b) Ecuația lui van der Waals redusă :

$$\left(p_r+\frac{3}{v_r^2}\right)\cdot(3v_r-1)=8T_r \qquad (8.5.)$$

în care parametrii adimensionali (mărimile de stare reduse) p_r, v_r şi T_r au expresiile :

$$p_r=\frac{p}{p_{cr}} \qquad (8.6.)$$

$$v_r=\frac{v}{v_{cr}} \qquad (8.7.)$$

$$T_r=\frac{T}{T_{cr}} \qquad (8.8.)$$

c) Constanta unor gaze reale :

$$R=f_{cr}\cdot\frac{p_{cr}\cdot v_{cr}}{T_{cr}} \qquad (8.9.)$$

unde f_{cr} este factorul critic care pentru câteva gaze reale are valorile :

Tabel 8.1.

Gazul	Ar N_2 O_2	Ben-zen	SO_2	C_2H_6 Etan	He	H_2	CH_4 Metan	CO_2 CO	Vapori de apă
f_{cr}	3,43	4,99	3,60	3,45	3,27	3,28	3,45	3,55	4,46

d) Ecuația de stare a gazelor reale de tip „Berthelot" :

$$\left(p+\frac{a_1}{T\cdot v^2}\right)\cdot\left(v-b_1\right)=R\cdot T \qquad (8.10.)$$

în care :

$$a_1=\frac{16}{3}\cdot p_{cr}\cdot v_{cr}^2 \qquad (8.11.)$$

$$b_1=\frac{v_{cr}}{4} \qquad (8.12.)$$

$$R=\frac{32}{9}\cdot\frac{p_{cr}\cdot v_{cr}}{T_{cr}} \qquad (8.13.)$$

e) Ecuația de stare Berthelot redusă :

$$\left(p_r+\frac{61}{3}\cdot\frac{1}{T_r\cdot v_r^2}\right)\cdot\left(v_r-\frac{1}{14}\right)=\frac{32}{9}T_r \qquad (8.14.)$$

p_r , v_r și T_r având semnificațiile date de relațiile 8.6. … 8.8.

f) Ecuația de stare a gazelor reale, de tip Wohl :

$$p\cdot\left(v-b_2\right)\cdot v^3=R\cdot T\cdot v^3-\frac{a_2\cdot v^2}{T}+\frac{c_2}{T^{4/3}}\cdot\left(v-b_2\right) \qquad (8.15.)$$

în care :

$$a_2=6\cdot p_{cr}\cdot v_{cr}^2\cdot T_{cr} \qquad (8.16.)$$

$$b_2=\frac{v_{cr}}{4} \qquad (8.17.)$$

$$c_2=4\cdot p_{cr}\cdot v_{cr}^3\cdot T_{cr}^{4/3} \qquad (8.18.)$$

$$R=\frac{15}{4}\cdot\frac{p_{cr}\cdot v_{cr}}{T_{cr}} \qquad (8.19.)$$

g) Ecuația de stare a lui Wohl, redusă :

$$p_r\cdot v_r=\frac{p_r}{4}+\frac{15}{4}\cdot T_r-\frac{5}{v_r\cdot T_r}+\frac{4}{v_r^2\cdot T_r^{4/3}}-\frac{1}{v_r^3\cdot T_r^{4/3}} \qquad (8.20.)$$

p_r , v_r și T_r având semnificațiile date de relațiile 8.6. … 8.8.

h) Căldura specifică masică la $p = ct.$ şi la $v = ct.$ pentru gaze reale :

$$c_p = c_{p0} + \frac{81}{32} \cdot R \cdot \frac{p}{p_{cr}} \cdot \left(\frac{T_{cr}}{T}\right)^3 \quad [J/kg \cdot K] \qquad (8.21.)$$

$$c_v = c_{v0} + \frac{27}{32} \cdot R \cdot \frac{p}{p_{cr}} \cdot \left(\frac{T_{cr}}{T}\right)^3 \quad [J/kg \cdot K] \qquad (8.22.)$$

unde c_{p0} şi c_{v0} sunt căldurile specifice la presiune constantă, respectiv la volum constant, considerate gaze perfecte la $0^\circ C$.

i) Ecuația efectului Joule-Thomson :

$$\frac{dT}{dp} = \frac{v}{c_p} \cdot (\gamma \cdot T - 1) \qquad (8.23.)$$

unde γ, în $1/grd$, reprezintă coeficientul de dilatare volumică a gazului.

j) Variația de temperatură realizată prin efectul Joule-Thomson :

$$\Delta T = T_1 - T_2 = A \cdot (p_1 - p_2) \cdot \left(\frac{273{,}15}{T_1}\right)^2 \quad [K] \qquad (8.24.)$$

în care constanta A are expresiile :

- Pentru aer : $A = 2{,}68 - 8{,}433 \cdot 10^{-4} \cdot p_1$
- Pentru oxigen : $A = 0{,}313 - 8{,}335 \cdot 10^{-4} \cdot p_1$
- Pentru bioxidul de carbon : $A = 1{,}35$.

p_1 fiind exprimată în bar.

k) Schimbul de căldură efectuat de gazul real într-un proces reversibil :

$$\delta q = c_v \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_V dp + c_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p dV \qquad (8.25.)$$

8.2. Probleme rezolvate

8.2.1. Să se determine expresiile lucrului mecanic efectuat într-o transformare izotermă de un gaz real, pentru care sunt valabile ecuațiile de stare :

a) van der Waals;

b) Berthelot.

Rezolvare :

a) Din relația (8.1.) găsim : $p = \frac{R \cdot T}{v-b} - \frac{a}{v^2}$

Ca urmare : $$L_{1-2} = m \cdot \left[\int_{v_1}^{v_2} \frac{R \cdot T}{v-b} dv - \int_{v_1}^{v_2} \frac{a}{v^2} dv \right]$$

$$L_{1-2} = m \cdot \left[R \cdot T \ln \frac{v_2 - b}{v_1 - b} + a \cdot \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right) \right]$$

b) Din relația (8.10.) găsim :

$$p = \frac{R \cdot T}{v - b_1} - \frac{a_1}{T \cdot v^2}$$

şi atunci : $$L_{1-2} = m \cdot \left[R \cdot T \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v - b_1} - \frac{a_1}{T} \cdot \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^2} \right]$$

$$L_{1-2} = m \cdot \left[R \cdot T \ln \frac{v_2 - b_1}{v_1 - b_1} + \frac{a_1}{T} \cdot \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right) \right]$$

8.2.2. Un gaz real pentru care este valabilă ecuația lui van der Waals suferă un proces de comprimare între două stări. Să se calculeze cantitatea elementară de căldură schimbată cu exteriorul.

Rezolvare :

Din relația (8.1.) găsim funcția $T = f(p, v)$

$$T = \frac{1}{R} \cdot \left(p + \frac{a}{v^2} \right) \cdot (v - b)$$

Pe de altă partea aplicarea relației (8.25) ne obligă să calculăm expresiile :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_V = \frac{v-b}{R}$$

$$\left(\frac{\partial T}{v}\right)_p = \frac{1}{R}\cdot\left[\frac{-2a}{v^3}\cdot(v-b)+\left(p+\frac{a}{v^2}\right)\right] = \frac{1}{R}\cdot\left(p-\frac{a}{v^2}+\frac{2\cdot a\cdot b}{v^3}\right)$$

În acest mod, relația (8.25.) devine :

$$\delta q = c_V\frac{v-b}{R}dp + \frac{c_p}{R}\cdot\left(p-\frac{a}{v^2}+\frac{2\cdot a\cdot b}{v^3}\right)$$

în care c_p, c_V şi R sunt date de relațiile (8.21.), (8.22), respectiv (8.4.).

8.2.3. Să se calculeze, utilizând ecuațiile lui van der Waals, Berthelot şi Wohl constanta R pentru benzen (C_6H_6) şi abaterile procentuale pe care le prezintă valorile obținute față de constanta gazului perfect.

Rezolvare :

Din anexa 22 se extrag mărimile critice de stare :

$$p_{cr} = 49{,}2\ bar = 49{,}2\cdot 10^5\ Pa$$

$$v_{cr} = 3{,}290\cdot 10^{-3}\ m^3/kg$$

$$T_{cr} = 273+289 = 562\ K$$

Atunci constanta R are valorile :

a) din ecuația van der Waals, relația (8.4.) :

$$R_a = \frac{8}{3}\cdot\frac{p_{cr}\cdot V_{cr}}{T_{cr}} = \frac{8}{3}\cdot\frac{49{,}2\cdot 10^5\cdot 3{,}290\cdot 10^{-3}}{562} = 76{,}8\ J/kg\cdot K$$

b) Din ecuația van der Waals corectată (relația 8.9.) :

$$R_b = f_{cr}\cdot\frac{p_{cr}\cdot v_{cr}}{T_{cr}}$$

$$f_{cr} = 4{,}99 \text{ (tabelul 8.1.)}$$

$$R_b = 4{,}99\cdot\frac{49{,}2\cdot 10^5\cdot 3{,}290\cdot 10^{-3}}{562} = 143{,}71\ J/kg\cdot K$$

c) din ecuația lui Berthelot relația (8.13.) :

$$R_c = \frac{32}{9}\cdot\frac{p_{cr}\cdot V_{cr}}{T_{cr}} = \frac{32}{9}\cdot\frac{49{,}2\cdot 10^5\cdot 3{,}290\cdot 10^{-3}}{562} = 102{,}4\ J/kg\cdot K$$

d) din ecuația lui Wohl, relația (8.19.) :

$$R_d = \frac{15}{4} \cdot \frac{p_{cr} \cdot V_{cr}}{T_{cr}} = \frac{15}{4} \cdot \frac{49{,}2 \cdot 10^5 \cdot 3{,}290 \cdot 10^{-3}}{562} = 108{,}0 \ \ J/kg \cdot K$$

Abaterile pe care aceste valori le prezintă față de constanta gazului perfect :

$$R_{C_6H_6} = \frac{8314}{M_{C_6H_6}} = \frac{8314}{78{,}108} = 106{,}4 \ \ J/kmol \cdot K$$

sunt :

$$\varepsilon_a = \frac{76{,}8 - 106{,}4}{106{,}4} = -0{,}278 = -27{,}8\%$$

$$\varepsilon_b = \frac{143{,}71 - 106{,}4}{106{,}4} = +0{,}351 = +35{,}1\%$$

$$\varepsilon_c = \frac{102{,}4 - 106{,}4}{106{,}4} = -0{,}038 = -3{,}8\%$$

$$\varepsilon_d = \frac{108 - 106{,}4}{106{,}4} = +0{,}015 = +1{,}5\%$$

8.2.4. Să se determine, utilizând ecuația van der Waals corectată, temperatura şi mărimile reduse de stare ale argonului, dacă o masă de $1 \ kg$ ocupă la presiunea de $1{,}5 \ bar$, un volum de $1 \ m^3$.

Rezolvare :

Din anexa 22 se obțin mărimile critice de stare ale argonului :

$p_{cr} = 48{,}6 \ bar$; $v_{cr} = 1{,}92 \cdot 10^{-3} \ m^3/kg$; $t_{cr} = -122{,}4^\circ C$; $T_{cr} = 150{,}6 \ K$, care împreună cu factorul critic, $f_{cr} = 3{,}43$ (tabela 8.1.), conduc la obținerea, din relația (8.9.), a constantei R :

$$R = 3{,}43 \cdot \frac{48{,}6 \cdot 10^5 \cdot 1{,}92 \cdot 10^{-3}}{150{,}6} = 212{,}52 \ \ J/kg \cdot K$$

Temperatura argonului se determină din ecuația van der Waals, relația (8.1.), cu valorile constantelor a şi b din relațiile (8.2. … 8.4.) :

$$a = 3 \cdot 48{,}6 \cdot 10^5 \cdot (1{,}92)^2 \cdot 10^{-6} = 53{,}75 \ ; \ b = \frac{1{,}92 \cdot 10^{-3}}{3} = 0{,}64 \cdot 10^{-3}$$

$$T = \frac{\left(1{,}5 \cdot 10^5 + \frac{53{,}75}{1}\right) \cdot \left(1 - 0{,}64 \cdot 10^{-3}\right)}{212{,}52} = 706 \ \ K$$

Mărimile reduse de stare ale argonului, relațiile (8.6.) … (8.8.) :

$$p_r = \frac{1{,}5}{48{,}6} = 3{,}08 \cdot 10^{-2}\,;\; v_r = \frac{1}{1{,}92 \cdot 10^{-3}} = 520{,}8\,;\quad T_r = \frac{706}{150{,}6} = 4{,}69$$

8.2.5. Să se exprime ecuațiile van der Waals, Berthelot şi Wohl, pentru un fluid real care are mărimile critice de stare : $p_{cr} = 60\ bar$; $v_{cr} = 4 \cdot 10^{-3}\ m^3/kg$; $T_{cr} = 400\ K$.

Rezolvare :

Ecuația van der Waals, relația (8.1.), cu valorile constantelor determinate din relațiile (8.2.) … (8.4.) :

$$a = 3 \cdot 60 \cdot 10^5 \cdot 16 \cdot 10^{-6} = 288\ ;\ b = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{3} = 1{,}33 \cdot 10^{-3}$$

$$R = \frac{8}{3} \cdot \frac{60 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{400} = 160$$

este de forma : $$\left(p + \frac{288}{v^2}\right) \cdot \left(v - 1{,}33 \cdot 10^{-3}\right) = 160\ T$$

Ecuația Berthelot, conținând constantele din relațiile (8.11.) … (8.13.) :

$$a_1 = \frac{16}{3} \cdot 60 \cdot 10^5 \cdot 16 \cdot 10^{-6} = 512\ ;\ b_1 = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{4} = 10^{-3}$$

$R = \dfrac{32}{9} \cdot \dfrac{10 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{400} = 213{,}3$, se determină din relația (8.13.) :

$$\left(p + \frac{512}{T \cdot v^2}\right) \cdot \left(v - 10^{-3}\right) = 213{,}3\ T$$

Ecuația de stare, de tip Wohl, relațiile (8.16.) şi (8.19.) :

$$a_2 = 6 \cdot 60 \cdot 10^5 \cdot 16 \cdot 10^{-6} \cdot 400 = 2{,}304 \cdot 10^5\ ;\ b_2 = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{4} = 10^{-3}$$

$$c_2 = 4 \cdot 60 \cdot 10^5 \cdot 64 \cdot 10^{-9} \cdot (400)^{4/3} = 4{,}526 \cdot 10^3$$

$$R = \frac{15}{4} \cdot \frac{60 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{400} = 225$$

$$p \cdot \left(v - 10^{-3}\right) \cdot v^3 = 225\ T \cdot V^3 - \frac{2{,}304 \cdot 10^5}{T} \cdot v^2 + \frac{4{,}526 \cdot 10^{-3}}{T^{4/3}} \cdot \left(v - 10^{-3}\right)$$

8.2.6. Să se determine cu ajutorul ecuațiilor de stare ale gazelor reale, van der Waals, Berthelot şi Wohl, presiunea etanului aflat în stările

termodinamice caracterizate prin următoarele valori ale volumului specific şi temperaturii :

1) $v_1 = 8{,}3\ m^3/kg$ **;** $T_1 = 300\ K$ **;** **2)** $v_2 = 1{,}1\ m^3/kg$ **;** $T_2 = 400\ K$ **;**

3) $v_3 = 0{,}14\ m^3/kg$ **;** $T_3 = 500\ K$ **;** **4)** $v_4 = 0{,}09\ m^3/kg$ **;** $T_4 = 700\ K$ **;**

5) $v_5 = 0{,}05\ m^3/kg$ **;** $T_5 = 900\ K$ **.**

Să se calculeze eroarea procentuală care rezultă faţă de valoarea presiunii calculată prin aplicarea ecuaţiei de stare a gazului perfect.

Rezolvare :

Mărimile critice de stare ale etanului (anexa 22) :

$$p_{cr} = 48{,}8\ bar\ ;\ v_{cr} = 4{,}93\cdot 10^{-3}\ m^3/kg\ ;\ t_{cr} = 32{,}2^{\circ}C\ ;\ T_{cr} = 305{,}2\ K\ ,$$

conduc prin aplicarea relaţiilor prezentate la paragraful 8.1. la determinarea constantelor :

$$a = 3\cdot 48{,}8\cdot 10^5\cdot\left(4{,}93\cdot 10^{-3}\right)^2 = 355{,}83\ N\cdot m^4/kg^2$$

$$b = \frac{4{,}93\cdot 10^{-3}}{3} = 1{,}31\cdot 10^{-3}\ m^3/kg$$

$$R = 3{,}45\cdot\frac{48{,}8\cdot 10^5\cdot 4{,}93\cdot 10^{-3}}{305{,}2} = 260{,}65\ J/kg\cdot K$$

$$a_1 = \frac{16}{3}\cdot 48{,}8\cdot 10^5\cdot\left(4{,}93\cdot 10^{-3}\right)^2 = 632{,}59\ N\cdot m^4/kg^2$$

$$b_1 = \frac{4{,}93\cdot 10^{-3}}{4} = 1{,}23\cdot 10^{-3}\ m^3/kg$$

$$R = \frac{32}{9}\cdot\frac{48{,}8\cdot 10^5\cdot 4{,}93\cdot 10^{-3}}{305{,}2} = 268{,}62\ J/kg\cdot K$$

$$a_2 = 6\cdot 48{,}8\cdot 10^5\cdot\left(4{,}93\cdot 10^{-3}\right)^2\cdot 305{,}2 = 2{,}172\cdot 10^5\ N\cdot m^4\cdot K/kg^2$$

$$b_2 = \frac{4{,}93\cdot 10^{-3}}{4} = 1{,}23\cdot 10^{-3}\ m^3/kg$$

$$c_2 = 4\cdot 48{,}8\cdot 10^5\cdot\left(4{,}93\cdot 10^{-3}\right)^3\cdot\left(30\cdot 5{,}2\right)^{4/3} = 4799{,}4\cdot N\cdot m^7\cdot K^{4/3}/kg^3$$

$$R = \frac{15}{4}\cdot\frac{48{,}8\cdot 10^5\cdot 4{,}93\cdot 10^{-3}}{305{,}2} = 283{,}31\ J/kg\cdot K$$

cu care valoarea presiunii se obţine, prin explicitare, din relaţiile (8.1.), (8.10.) şi (8.15.), reprezentând ecuaţiile de stare van der Waals, Berthelot, respectiv Wohl :

$$\alpha)\ p = \frac{r \cdot T}{v - b} - \frac{a}{v^2};\ \beta)\ p = \frac{r \cdot T}{v - b'} - \frac{a'}{v^2};$$

$$\gamma)\ p = \frac{r \cdot T \cdot v^3 - \frac{a''}{T} \cdot v^3 + \frac{c}{T^{4/3}} \cdot (v - b'')}{v^3 \cdot (v - b'')}.$$

Valorile astfel determinate sunt prezentate în tabelul 8.2.

Tabelul 8.2.

Starea	v $[m^3/kg]$	T $[K]$	Presiunea p, în $[bar]$, obținută din ecuația de stare :		
			Van der Waals	Berthelot	Wohl
1	8,30	300	0,094	0,097	0,109
2	1,10	400	0,950	0,980	1,030
3	0,14	500	9,210	9,680	10,180
4	0,09	700	20,130	21,170	21,970
5	0,05	900	46,740	49,550	51,310

Considerând etanul un gaz perfect, valoarea presiunii se calculează cu ajutorul ecuației de stare, în care constanta gazului perfect, $R = 276{,}53\ \ J/kg \cdot K$, rezultând :

$$p_1 = \frac{276{,}53 \cdot 300}{8{,}3} \cdot 10^{-5} = 0{,}1\ bar;\quad p_2 = \frac{276{,}53 \cdot 400}{1{,}1} \cdot 10^{-5} = 1{,}00\ bar;$$

$$p_3 = \frac{276{,}53 \cdot 500}{0{,}14} \cdot 10^{-5} = 9{,}88\ bar;\quad p_4 = \frac{276{,}53 \cdot 700}{0{,}09} \cdot 10^{-5} = 21{,}51\ bar$$

$$p_5 = \frac{276{,}53 \cdot 900}{0{,}05} \cdot 10^{-5} = 49{,}77\ bar$$

Erorile procentuale rezultate din considerarea valorilor din tabela 8.2., față de valorile de mai sus ale presiunilor, calculate pentru etanul considerat un gaz perfect, sunt prezentate în tabela 8.3.

Tabelul 8.3.

Presiunea calculată cu ecuația de stare	Eroarea $\frac{\Delta p}{p} \cdot 100[\%]$, în starea fizică				
	1	2	3	4	5
Van der Waals	-6,0%	-5,0%	-6,70%	-6,4%	-6,10%
Berthelot	-3,0%	-2,0%	-2,02%	-1,6%	-0,44%
Wohl	+9,0%	+3,0%	+3,03%	+2,1%	+3,09%

RĂSPUNSURILE LA TESTELE GRILĂ

Testul grilă 1.4

Întrebarea	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1	*		*		*	*
2		*				*
3	*		*	*		*
4	*		*	*	*	
5		*	*	*	*	
6		*	*			*
7	*		*	*	*	*
8	*		*	*		*
9	*	*	*			*
10	*		*	*		

Testul grilă 2.4

Întrebarea	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1		*		*	*	*
2		*	*			
3	*			*		
4		*				
5		*				
6	*					
7			*			
8			*			
9		*				
10		*				

Testul grilă 3.4

Întrebarea	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1	*	*	*		*	*
2			*	*		*
3	*				*	
4	*			*		*
5		*				
6		*	*			

Testul grilă 4.4

Întrebarea	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1		*		*		
2		*	*		*	
3		*				
4	*			*		
5			*			
6		*		*		

Testul grilă 5.4

Întrebarea	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1			*			
2		*	*	*		
3		*				
4	*		*			*
5	*	*	*		*	
6		*	*			*
7		*	*		*	*
8			*	*		*
9	*			*	*	*
10	*	*	*		*	

Testul grilă 6.4

Întrebarea	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1			*			*
2		*				
3			*			
4	*					
5			*	*		
6				*	*	
7	*	*				*
8			*	*	*	
9		*				
10	*					
11	*	*		*		
12					*	
13					*	
14	*				*	*
15		*				
16	*					
17		*				
18			*			
19				*	*	*
20	*					

Testul grilă 7.4

Întrebarea	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1	*		*	*	*	
2	*	*	*	*	*	*
3	*					
4		*	*	*		
5			*	*	*	
6	*					
7	*	*	*	*		*
8		*	*	*		*
9	*	*				*
10			*	*		*
11	*		*			
12	*		*			
13		*	*			
14	*			*	*	*
15		*		*	*	

ANEXE

Anexa 1

Căldura specifică a corpurilor solide simple

		Temperatura		**Căldura masică**	
Corpul	**Simbol**	t	T	c	
		$^{\circ}C$	K	$kcal/kg \cdot grd$	$kJ/kg \cdot K$
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Aluminiu	Al	0	273,15	0,2100	0,879
		20	293,15	0,2140	0,896
		100	373,15	0,2240	0,938
		200	473,15	0,2350	0,984
		300	573,15	0,2410	1,009
		400	673,15	0,2490	1,043
		500	773,15	0,2600	1,089
Cupru	Cu	0	273,15	0,0906	0,379
		20	293,15	0,0915	0,383
		100	373,15	0,0947	0,396
		200	473,15	0,0969	0,406
		300	573,15	0,0994	0,416
		400	673,15	0,1020	0,427
		500	773,15	0,1049	0,439
Fier	Fe	0	273,15	0,1050	0,440
		20	293,15	9,1080	0,452
		100	373,15	0,1160	0,486
		200	473,15	0,1270	0,532
		300	573,15	0,1390	0,582
		400	673,15	0,1500	0,628
		500	773,15	0,1620	0,678
		600	873,15	0,1800	0,754
		700	973,15	0,2030	0,848
		800	1073,15	0,2230	0,932

Anexa 1 (continuare)

1	2	3	4	5	6
Nichel	Ni	0	273,15	0,1050	0,442
		20	293,15	0,1060	0,444
		100	373,15	0,1110	0,467
		200	473,15	0,1230	0,515
		300	573,15	0,1360	0,569
		400	673,15	0,1300	0,644
		700	973,15	0,1300	0,644
Platină	Pt	0	273,15	0,0317	0,133
		20	293,15	0,0318	0,133
		100	373,15	0,0324	0,136
		200	473,15	0,0325	0,136
		300	573,15	0,3260	0,136
		500	773,15	0,0349	0,146
Plumb	Pb	0	273,15	0,0306	0,128
		20	293,15	0,0309	0,129
		100	373,15	0,0320	0,134
		200	473,15	0,0330	0,138
		300	573,15	0,0338	0,142
Zinc	Zn	0	273,15	0,0910	0,381
		20	293,15	0,0920	0,385
		100	373,15	0,0950	0,398
		200	473,15	0,0990	0,414
		300	573,15	0,1000	0,420
		400	673,15	0,1100	0,461

Anexa 2

Conductivitatea termică şi densitatea metalelor

Metalul	**Sim-bol**	**Temperatura**		**Densitate**	**Conductivitatea termică**	
		t	T	ρ	λ	
		$^{\circ}C$	K	kg/m^3	$kcal/mh\ grd$	W/mK
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Aluminiu 99% ÷ ÷99,75%	A1	0	273,15	2700	180	209,34
		100	373,15		178	207,01
		300	573,15		191	222,13

Anexa 2 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7
Cupru co-mercial	Cu	20	293,15	8300	320	372,16
		0	273,15		340	395,42
		100	373,15	8900	337	391,93
Electroli-tic pur		300	573,15		328	381,46
Cupru pur 99,98%		0	273,15		332	386,11
		100	373,15		326	379,15
		200	473,15	8930	321	373,32
		400	673,15		313	364,01
		600	873,15		304	353,55
Fier (oțel) 99,2% Fe+ 0,2% C	Fe	0	273,15	7800	39	45,35
		100	373,15		39	45,35
		300	573,15		37	43,01
		500	773,15		32	37,21
Nichel 97% ÷ 99%	Ni	0	273,15	8800	50	58,15
		100	373,15		49	56,98
		200	473,15		47	54,66
Zinc pur	Zn	0	273,15	7130	97	112,81
		100	373,15		94,5	109,90
		200	473,15		91	105,83

Anexa 3

Conductivitatea termică şi densitatea materialelor de construcție

Materialul	Temperatura		Densitate	Conductivitatea termică	
	t	T	ρ	λ	
	$^{\circ}C$	K	kg/m^3	$kcal/mh$ grd	W/mK
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Beton armat	20	293,15	600	1,50	1,512
Beton	20	293,15	1800	0,15…0,30	0,174…0,349
expandat	20	293,15	2000	0,83	0,965
Beton cu	20	293,15	2200	1,00	1,163
pietriş	20	293,15		1,30	1,512

Anexa 3 (continuare)

1	2	3	4	5	6
Cărămidă	20	293,15	800	0,24	0,279
	20	293,15	1000	0,28	0,326
	20	293,15	1200	0,33	0,384
	20	293,15	1400	0,38	0,442
	20	293,15	1600	0,45	0,523
	20	293,15	1800	0,63	0,733
	20	293,15	2000	1,06	1,233
Cărămidă silicoasă	100	373,15		0,95	1,105
	500	773,15	1800 -	0,9…1,1	1,047…1,279
	1000	1273,15	2200	0,95…1,20	1,105…1,396

Anexa 4

Conductivitatea termică şi densitatea materialelor izolante

Materialul	Temperatura		Densitate	Conductivitatea termică	
	t	T	ρ	λ	
	$^\circ C$	K	kg/m^3	$kcal/mh\ grd$	W/mK
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Azbest	0	273,15		0,096	0,112
	50	323,15	383	0,099	0,115
	100	373,15		0,102	0,119
Azbest plăci	20	293,15	2000	0,600	0,698
Diatomită	200	473,15	466	0,108	0,126
	200	473,15	605	0,147	0,171
	200	473,15	790	0,159	0,185
Fibre de sticlă	0	273,15		0,030	0,035
	50	323,15	220	0,037	0,043
	100	373,15		0,043	0,050
	200	473,15		0,057	0,066
Perpendicular pe direcția de propagare a căldurii	0	273,15		0,030	0,035
	50	323,15		0,038	0,044
	100	373,15	186	0,047	0,055
	200	473,15		0,068	0,079
	300	573,15		0,092	0,107

Anexa 4 (continuare)

1	2	3	4	5	6
Vată de azbest	25	298,15	140	0,043	0,050
Vată de sticlă	20	293,15	50	0,032	0,037
	20	293,15	100	0,031	0,036
	20	293,15	200	0,034	0,040
	100	373,15	200	0,045	0,052
	300	573,15	200	0,090	0,105

Anexa 5

Puterea calorică a combustibililor lichizi

Combustibil	Combustibil brut uscat în aer							
	Compoziția gravimetrică %							Puterea calorică H_i
	C	H	S	O	N	A	W	kJ/kg
Antracit	85,6	1,8	0,7	2,0	0,98	8	1	31192
Cocs metalurgic	87,3	0,5	0,9	0,8	0,50	8	2	20103
Huilă								
- uscată	75,2	4,6	0,9	8,8	0,50	8	2	28973
- de gaz	74,8	4,8	0,7	6,6	1,10	10	2	29433
Lignit	49,6	3,7	0,4	18,7	0,60	7	20	19678
Lemn	39,3	4,7	-	34,1	0,40	1,5	20	14277

Anexa 6

Căldura specifică (c) a unor lichide

Lichidul	Formula chimică	Temperatura		Căldura specifică c	
		$t[^\circ C]$	$T[K]$	$[kcal/kg \cdot grd]$	$[kJ/kg \cdot K]$
1	2	3	4	5	6
Apă	H_2O	0	273,15	1,008	4,220
		20	293,15	0,999	4,183
		40	313,15	0,998	4,178
		60	333,15	1,001	4,191
		80	353,15	1,005	4,199
		100	373,15	1,007	4,216
		120	393,15	1,011	4,233
		140	413,15	1,017	4,258

Anexa 6 (continuare)

1	2	3	4	5	6
Apă	H_2O	150	423,15	1,020	4,271
		160	433,15	1,023	4,283
		180	453,15	1,050	4,396
		200	473,15	1,075	4,501
		220	493,15	1,100	4,605
		240	513,15	1,130	4,731
		250	523,15	1,160	4,857
		260	533,15	1,190	4,982
		280	553,15	1,250	5,234
		300	573,15	1,360	5,694
Petrol brut		20	293,15	0,210	0,879
Ulei de ungere	-	20	293,15	0,442	1,851
		40	313,15	0,462	1,934
		60	333,15	0,482	2,018
		80	353,15	0,502	2,102
		100	373,15	0,522	2,186

Anexa 7

Densitatea ρ a lichidelor

Lichidul	**Formula chimică**	**Temperatura**		**Densitatea**
		t	T	ρ
		$^\circ C$	K	kg/m^3
Apă	H_2O	0	273,15	1000
		20	293,15	998
		40	313,15	992
		60	333,15	983
		80	353,15	972
		100	373,15	958
		120	393,15	944
		140	413,15	926
		160	433,15	908
		180	453,15	887
		200	473,15	853
		220	493,15	837
		240	513,15	809
		260	533,15	779
		280	553,15	750
		300	573,15	700

Anexa 7 (continuare)

0	1	2	3	4
Petrol	-	20	293,15	760…860
Ulei de ungere	-	20	293,15	871
		40	313,15	858
		60	333,15	845
		80	353,15	832
		100	373,15	820
		120	393,15	807

Anexa 8

Viscozitatea dinamică (η) a lichidelor

Lichidul	Formula chimică	Temperatura		Viscozitatea dinamică	
		t	T	$\eta \cdot 10^4$	
		$^\circ C$	K	$kgfs/m^2$	$Pa \cdot s$
1	2	3	4	5	6
Apă	H_2O	0	273,15	1,8240	17,887
		5	278,15	1,5454	15,155
		10	283,15	1,3318	13,061
		15	288,15	1,1631	11,406
		20	293,15	1,0244	10,046
		25	298,15	0,9117	8,991
		30	303,15	0,8177	8,019
		35	308,15	0,7245	7,205
		40	313,15	0,6662	6,533
		45	318,15	0,6075	5,958
		50	323,15	0,5605	5,497
		55	328,15	0,5172	5,072
		60	333,15	0,4794	4,701
		65	338,15	0,4445	4,359
		70	343,15	0,4142	4,062
		75	348,15	0,3869	3,794
		80	353,15	0,3626	3,556
		85	358,15	0,3407	3,341
		90	363,15	0,3208	3,146
		95	368,15	0,3040	2,981
		100	373,15	0,2877	2,821

Anexa 8 (continuare)

1	2	3	4	5	6
Ulei de ungere	-	20	293,15	13,3100	130,527
		40	313,15	6,9400	68,058
		60	333,15	4,2600	41,776
		80	353,15	2,8900	28,341
		100	373,15	2,040	20,006

Anexa 9

Conductivitatea termică (λ) a lichidelor

Lichidul	**Formula chimică**	**Temperatura**		**Conductivitatea termică**	
		t	T	λ	
		$^\circ C$	K	$[kcal/mh \cdot grd]$	W/mK
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Apă	H_2O	0	273,15	0,477	0,555
		20	293,15	0,514	0,598
		40	313,15	0,539	0,627
		60	333,15	0,560	0,651
		80	353,15	0,575	0,669
		100	373,15	0,586	0,682
		120	393,15	0,589	0,685
		140	413,15	0,588	0,684
		150	423,15	0,587	0,683
		160	433,15	0,585	0,680
		180	453,15	0,579	0,673
		200	473,15	0,572	0,665
		220	493,15	0,561	0,662
		240	514,15	0,545	0,634
		250	523,15	0,537	0,624
		260	533,15	0,527	0,613
		280	533,15	0,506	0,588
		300	573,15	0,485	0,564
Ulei de ungere	-	0	273,15	0,124	0,144
		20	293,15	0,124	0,144
		40	313,15	0,123	0,143
		60	333,15	0,122	0,142
		80	353,15	0,121	0,141
		100	373,15	0,120	0,140
		120	393,15	0,119	0,130

Anexa 10

Puterile calorice (H_i) şi densitatea unor combustibili lichizi

Combustibil	Formula chimică	Densitatea la $15^\circ C$	Compoziţie				Putere calorică
		ρ kg/m^3	C	H	O+S	S	H_i kJ/kg
Alcool 100 %	C_2H_5OH	794	52,0	13	-	-	26796
95 %		809	-	-	-	-	25246
90%		823	-	-	-	-	23865
85%		826	-	-	-	-	22316
Benzină de petrol		760	80,7	14,2	5,1	-	42035
Gaze lichefiate		2220	82,5	17,5	-	-	46055
Motorină		870	86,6	12,9	0,2	0,3	41843
Petrol (gaz)		810	85,0	15	-	-	39775
Toluen	C_7H_8	867	91,2	8,8	-	-	40528
Uleiuri de petrol							
- uşoare		900	85,4	12,3	1,6	1,6	42077
- grele		950	85,1	11,7	2,1	2,1	41784
- de Mexic		900	82,9	12,2	2,1	2,8	40277

Anexa 12

Coeficienţii pentru calculul căldurilor specifice la presiune constantă, în $[kJ/kg \cdot K]$, pe intervalul de temperatură 0 … 1500°C

Gazul	Formula chimică	a	$b \cdot 10^4$
Aer	-	1,0006	1,574
Azot	N_2	1,0425	1,528
Bioxid de carbon	CO_2	0,8248	3,236
Hidrogen	H_2	14,2351	13,825
Oxid de carbon	CO	1,0509	1,633
Oxigen	O_2	0,9127	1,871
Vapori de apă	H_2O	1,8547	5,652

Proprietățile fizice și termice ale gazelor reale

Gazul	**Formula chimică**	**Masa molară**	**Densitatea la $0^\circ C$ și 760 mm Hg**	**Constanta gazului**	**Căldura specifică la $0^\circ C$**	$k = \frac{c_p}{c_v}$
		M	ρ	R	c_p	
		$kg/kmol$	kg/m^3	$J/kg \cdot K$	$kJ/kg \cdot K$	
Acetilenă	C_2H_2	26,040	1,17090	319,599	1,641	1,23
Acid clorhidric(gaz)	HCl	36,465	1,63910	228,005	0,812	1,42
Aer	-	28,960	1,29280	287,041	1,227	1,40
Amoniac	NH_3	17,031	0,77140	488,175	2,060	1,32
Anhidridă carbonică	CO_2	44,090	1,97480	188,778	0,825	1,31
Anhidridă sulfuroasă	SO_2	64,060	2,92630	129,840	0,632	1,40
Azot	N_2	28,016	1,25050	296,749	1,043	1,40
Clor	Cl_2	70,914	3,22000	117,288	0,502	1,34
Etan	C_2H_6	30,070	1,35600	276,744	1,666	1,22
Heliu	He	4,002	0,17850	2079,010	5,234	1,66
Hidrogen	H_2	2,0156	0,08987	4121,735	14,235	1,41
Metan	CH_4	16,040	0,71680	518,722	2,117	1,30
Oxid azotic	NO	30,008	1,34020	277,136	1,009	1,40
Oxid de carbon	CO	28,010	1,25000	296,945	1,051	1,40
Oxigen	O_2	32,000	1,42980	259,778	0,913	1,40

Anexa 13.a.

Căldura specifică (c_p) a gazelor la presiune constantă

Temperatura		O_2	H_2	H_2O	N_2	**Aer**
$t\ [^\circ C]$	$T\ [K]$	$c_p\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_p\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_p\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_p\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_p\ [kJ/kg \cdot K]$
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
0	273,15	0,9148	14,1949	1,8594	1,0392	1,0036
100	373,15	0,9337	14,4482	1,8903	1,0421	1,0103
200	473,15	0,9630	14,5043	1,9406	1,0517	1,0245
300	573,15	0,9948	14,5332	2,0005	1,0693	1,0446
400	673,15	1,0237	14,5809	2,0645	1,0915	1,0685
500	773,15	1,0484	14,6622	2,1319	1,1154	1,0923
600	873,15	1,0689	14,7786	2,2014	1,1392	1,1149
700	973,15	1,0856	14,9301	2,2730	1,1614	1,1355
800	1073,15	1,0999	15,1148	2,3450	1,1815	1,9539
900	1173,15	1,1120	15,3120	2,4154	1,1991	1,1702
1000	1273,15	1,1229	15,5175	2,4824	1,2150	1,1844
1100	1373,15	1,1317	15,7357	2,5456	1,2288	1,1970
1200	1473,15	1,1401	15,9496	2,6042	1,2410	1,2083
1300	1573,15	1,1484	16,1657	2,6586	1,2514	1,2179
1400	1673,15	1,1564	16,3961	2,7089	1,2606	1,2267
1500	1773,15	1,1639	16,5642	2,7553	1,2686	1,2347
1600	1873,15	1,1710	16,7472	2,7980	1,2761	1,2418
1700	1973,15	1,1786	16,9218	2,8382	1,2824	1,2485
1800	2073,15	1,1857	17,0855	2,8742	1,2883	1,2544
1900	2173,15	1,1928	17,2433	2,9073	1,2933	1,2602
2000	2273,15	1,2004	17,3890	2,9379	1,2979	1,2653

Anexa 13.a. (continuare)

1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
2100	2373,15	1,2075	17,5259	2,9668	1,3021	1,2703
2200	2473,15	1,2142	17,6608	2,9936	1,3063	1,2749
2300	2573,15	1,2213	17,7834	3,0178	1,3096	1,2791
2400	2673,15	1,2280	17,9019	3,0409	1,3130	1,2833
2500	2773,15	1,2343	18,0141	3,0618	1,3159	1,2870
2600	2873,15	1,2410	18,1201	3,0819	1,3209	1,2925
2700	2973,15	1,2472	18,2197	3,1007	1,3239	1,2925
2800	3073,15	1,2493	18,3415	3,1187	1,3272	1,2979
2900	3173,15	1,2548	18,4454	3,1355	1,3285	1,3008
3000	3273,15	1,2602	18,5475	3,1355	1,3314	1,3021

Anexa 13.b.

Căldura specifică (c_p) a gazelor la presiune constantă

Temperatura		CO	CO_2	N_2O	SO_2	H_2S
$t\ [^\circ C]$	$T\ [K]$	$c_p\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_p\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_p\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_p\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_p\ [kJ/kg \cdot K]$
0	273,15	1,0396	0,8148	0,7508	0,607	0,992
100	373,15	1,0446	0,9136	0,9500	0,662	1,026
200	473,15	1,0584	0,9927	1,0283	0,712	1,068
300	573,15	1,0802	1,0567	1,0932	0,754	1,122
400	673,15	1,1057	1,1103	1,1472	0,753	1,172
500	773,15	1,1321	1,1547	1,1928	0,808	1,227
600	873,15	1,1568	1,1920	1,2313	0,825	1,273
700	973,15	1,1790	1,2230	1,2632	0,837	1,319
800	1073,15	1,1987	1,2493	1,2912	0,850	1,361
900	1173,15	1,2158	1,2715	1,3151	0,858	1,398
1000	1273,15	1,2305	1,2900	1,3352	0,867	1,432

Anexa 13.b. (continuare)

1	2	3	4	5	6	7
1100	1373,15	1,2435	1,3059	1,3532	0,871	1,461
1200	1473,15	1,2544	1,3197	-	0,875	1,482
1300	1573,15	1,2644	1,3314	-	0,879	-
1400	1673,15	1,2728	1,3415	-	0,883	-
1500	1773,15	1,2799	1,3498	1,3624	0,888	1,587
1600	1873,15	1,2866	1,3574	-	0,888	-
1700	1973,15	1,2925	1,3636	-	0,892	-
1800	2073,15	1,2979	1,3695	-	0,892	-
1900	2173,15	1,3025	1,3741	-	0,892	-
2000	2273,15	1,3067	1,3083	1,3737	0,896	1,595
2100	2373,15	1,3105	1,3816	-	0,896	-
2200	2473,15	1,3138	1,3842	-	0,896	-
2300	2573,15	1,3172	1,3862	-	0,896	-
2400	2673,15	1,3201	1,3875	-	0,896	-
2500	2773,15	1,3230	1,3879	1,3879	0,900	1,679
3000	3273,15	1,3356	1,3942	1,3942	0,900	1,704

Anexa 14.a.

Căldura specifică (c_v) a gazelor la volum constant

Temperatura		O_2	H_2	H_2O	N_2	Aer
$t\ [^{\circ}C]$	$T\ [K]$	$c_v\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_v\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_v\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_v\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_v\ [kJ/kg \cdot K]$
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
0	273,15	0,6548	10,0705	1,3980	0,7423	0,7164
100	373,15	0,6737	10,3238	1,4290	0,7453	0,7231
200	473,15	0,7030	10,3799	1,4792	0,7553	0,7373
300	573,15	0,7348	10,4088	1,5386	0,7725	0,7578
400	673,15	0,6737	10,4565	1,6027	0,7947	0,7813
500	773,15	0,7674	10,4378	1,6701	0,8185	0,8051
600	873,15	0,8089	10,6537	1,7400	0,8424	0,8281
700	973,15	0,8261	10,8653	1,8116	0,8646	0,8487
800	1073,15	0,8403	10,9904	1,8836	0,0047	0,8671
900	1173,15	0,8520	11,1875	1,9536	0,9027	0,8834
1000	1273,15	0,8625	11,3931	2,0210	0,9182	0,8976
1100	1373,15	0,8717	11,6113	2,0838	0,9320	0,9102
1200	1473,15	0,8805	11,8252	2,1407	0,9441	0,9211
1300	1573,15	0,8884	12,0412	2,1972	0,9546	0,9311
1400	1673,15	0,8964	12,2447	2,2475	0,9638	0,9399
1500	1773,15	0,9039	12,4398	2,2939	0,9722	0,9479
1600	1873,15	0,9115	12,6228	2,3367	0,9793	0,9550
1700	1973,15	0,9186	12,7970	2,3763	0,9856	0,9631
1800	2073,15	0,9261	12,9611	2,4129	0,9914	0,9676
1900	2173,15	0,9332	13,1189	2,4459	0,9965	0,9730
2000	2273,15	0,9404	13,2642	2,4765	1,0011	0,9785

Anexa 14.a. (continuare)

1	2	3	4	5	6	7
2100	2373,15	0,9475	13,4015	2,5054	1,0053	0,9831
2200	2473,15	0,9546	13,5363	2,5318	1,0094	0,9877
2300	2573,15	0,9613	13,6590	2,5565	1,0128	0,9919
2400	2673,15	0,9680	13,7775	2,5791	1,0161	0,9960
2500	2773,15	0,9747	13,8897	2,6004	1,0191	0,9998
2600	2873,15	0,9810	13,9956	2,6205	-	-
2700	2973,15	0,9872	14,0953	2,6394	-	-
2800	3073,15	-	-	2,6574	-	-
2900	3173,15	-	-	2,6741	-	-
3000	3273,15	-	-	-	-	-

Anexa 14.b.

Căldura specifică (c_v) a gazelor la volum constant

Temperatura		CO	CO_2	N_2O	SO_2	H_2S
$t\ [^\circ C]$	$T\ [K]$	$c_v\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_v\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_v\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_v\ [kJ/kg \cdot K]$	$c_v\ [kJ/kg \cdot K]$
0	273,15	0,7427	0,6259	0,6619	0,477	0,745
100	373,15	0,7478	0,7247	0,7607	0,532	0,779
200	473,15	0,7616	0,8039	0,8395	0,582	0,825
300	573,15	0,7834	0,8679	0,9043	0,624	0,875
400	673,15	0,8089	0,9111	0,5984	0,653	0,929
500	773,15	0,8353	0,9659	0,0040	0,678	0,980
600	873,15	0,8600	1,0027	1,0425	0,695	1,030
700	973,15	0,8822	1,0341	1,0743	0,708	1,076
800	1073,15	0,9018	1,0601	1,1020	0,720	1,118
900	1173,15	0,9100	1,0823	1,1258	0,729	1,156
1000	1273,15	0,7337	0,1011	1,1463	0,737	1,185

Anexa 14.b. (continuare)

1	2	3	4	5	6	7
1100	1373,15	0,9466	1,1170	1,1677	0,741	1,214
1200	1473,15	0,9575	1,1304	-	0,745	1,239
1300	1573,15	0,9675	1,1422	-	-	-
1400	1673,15	0,9755	1,1522	-	-	-
1500	1773,15	0,9831	1,1610	-	-	-
1600	1873,15	0,9898	1,1685			
1700	1973,15	0,9956	1,1748			
1800	2073,15	1,0006	1,1807			
1900	2173,15	1,0057	1,1853			
2000	2273,15	1,0099	1,1891			
2100	2373,15	1,0136	1,1924			
2200	2473,15	1,0170	1,1953			
2300	2573,15	1,2003	1,1974			
2400	2673,15	1,0233	1,1987			
2500	2773,15	1,0258	1,1991			

Anexa 15

Viscozitatea dinamică (η) a gazelor

Gazul	**Formula chimică**	**Temperatura**		**Viscozitatea dinamică**	
		t	T	$\eta \cdot 10^6$	
		$^\circ C$	K	$kgfs/m^2$	$Pa \cdot s$
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Aer	-	0	273,15	1,753	17,19
		50	323,15	1,964	19,26
		100	373,15	2,166	21,24
		150	423,15	2,365	23,19
		200	473,15	2,562	25,12
		250	523,15	2,757	27,04
		300	573,15	2,943	28,86
		350	623,15	3,128	30,68
		400	673,15	3,309	32,45
		450	723,15	3,480	34,13
		500	773,15	3,640	35,70
Anhidridă carbonică	CO_2	0	273,15	1,409	13,82
		22	295,15	1,500	14,71
		50	373,15	1,652	16,20
		100	323,15	1,881	18,45
		145	419,15	2,081	30,41
		235	508,15	2,463	24,15
		300	573,15	2,733	26,80
		417	690,15	3,167	31,06
		490	763,15	3,365	33,00
		574	847,15	3,745	36,73
		685	958,15	3,875	38,00
		764	1037,15	4,164	40,84
Anhidridă sulfuroasă	SO_2	0	273,15	1,181	11,58
		20	293,15	1,279	12,54
		40	313,15	1,379	13,52
		60	333,15	1,484	14,55
		80	353,15	1,570	15,40
		100	373,15	1,644	16,12
		120	393,15	1,750	17,16
		150	423,15	1,867	18,31
		200	473,15	2,078	20,38

Anexa 15 (continuare)

1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Anhidridă sulfuroasă	SO_2	293	566,15	2,495	24,47
		421	694,15	2,946	28,89
		490	763,15	3,176	31,15
		595	868,15	3,489	34,22
		679	952,15	3,774	37,01
		823	1096,15	4,181	41,00
Azot	N_2	0	273,15	1,693	16,60
		50	323,15	1,917	18,80
		100	373,15	2,121	20,80
		200	473,15	2,508	24,60
		400	673,15	3,171	31,10
		600	873,15	3,732	36,60
		800	1073,15	4,211	41,30
Oxid de azot	NO	0	273,15	1,832	17,97
		20	293,15	1,913	18,76
		50	323,15	2,076	20,36
		100	373,15	2,317	22,72
		200	473,15	2,735	26,82
Hidrogen	H_2	0	273,15	0,857	8,40
		50	323,15	0,959	9,40
		100	373,15	1,050	10,30
		200	473,15	1,234	12,10
		300	573,15	1,417	13,90
		400	673,15	1,570	15,40
		500	773,15	1,723	16,90
		600	873,15	1,866	18,30
		700	973,15	1,999	19,60
		800	1073,15	2,141	21,00
Oxid de carbon	CO	0	273,15	1,693	16,60
		20	293,15	1,795	17,60
		50	323,15	1,927	18,90
		100	373,15	2,141	21,00
		150	423,15	2,335	22,00
		200	473,15	2,519	24,70
		250	523,15	2,692	26,40
		300	573,15	2,845	27,90

Anexa 15 (continuare)

1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Oxigen	O_2	0	273,15	1,958	19,20
		50	323,15	2,223	21,80
		100	373,15	2,488	24,40
		200	473,15	2,957	29,00
		400	673,15	3,763	36,90
		600	873,15	4,436	43,50
		800	1073,15	5,027	49,30
Vapori de apă	H_2O	100	373,15	1,280	12,55
		200	473,15	1,667	16,35
		300	573,15	2,064	20,24
		500	773,15	2,730	26,77

Anexa 16

Conductivitatea termică (λ) a gazelor

Gazul	**Formula chimică**	**Temperatura**		**Conductivitatea termică**	
		t	T	λ	
		$^\circ C$	K	$[kcal/mh \cdot grd]$	W/mK
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Aer	-	0	273,15	0,02040	0,02373
		20	293,15	0,02160	0,02512
		40	313,15	0,02280	0,02652
		50	323,15	0,02300	0,02680
		60	333,15	0,02400	0,02791
		80	353,15	0,02520	0,02931
		100	373,15	0,02640	0,03070
		120	393,15	0,02750	0,03198
		140	413,15	0,02860	0,03326
		160	433,15	0,02960	0,03442
		180	453,15	0,03070	0,03570
		200	473,15	0,03180	0,03698
		250	523,15	0,03440	0,04001
		300	573,15	0,03690	0,04291
		350	623,15	0,03930	0,04571
		400	673,15	0,04170	0,04850
		500	773,15	0,04640	0,05396
		600	873,15	0,05000	0,05815
		800	1073,15	0,05750	0,06687
		1000	1273,15	0,06550	0,07618

Anexa 16 (continuare)

1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Anhidridă carbonica	CO_2	0	273,15	0,01220	0,01424
		20	293,15	0,11370	0,01591
		50	323,15	0,01530	0,01779
		100	373,15	0,01800	0,02093
		200	473,15	0,02450	0,02847
		300	573,15	0,03020	0,03517
		496	769,15	0,04250	0,04943
		546	819,15	0,05110	0,05943
Anhidridă sulfuroasă	SO_2	0	273,15	0,00720	0,00837
		100	373,15	0,01030	0,01198
Azot	N_2	0	273,15	0,02052	0,02386
		20	293,15	0,02196	0,02554
		50	323,15	0,02376	0,02763
		100	373,15	0,02628	0,03056
		150	423,15	0,02850	0,03315
		200	473,15	0,03060	0,03559
		250	523,15	0,03250	0,03780
		300	573,15	0,03420	0,03977
		500	773,15	0,04030	0,04689
Oxid de azot	NO	0	273,15	0,02040	0,02373
		50	323,15	0,01940	0,02261
Hidrogen	H_2	0	273,15	0,15000	0,17543
		20	293,15	0,16000	0,18631
		40	313,15	0,16900	0,19655
		60	333,15	0,17900	0,20818
		80	353,15	0,18800	0,21864
		100	373,15	0,19700	0,22911
		120	393,15	0,20600	0,23958
		140	413,15	0,21500	0,25005
		160	433,15	0,22300	0,25935
		180	453,15	0,23000	0,26749
		200	473,15	0,23700	0,27563
		240	513,15	0,24800	0,28842
		300	573,15	0,26600	0,30940
		500	773,15	0,33000	0,38379
		1000	1273,15	0,51000	0,59313
Oxid de carbon	CO	0	273,15	0,01908	0,02219

Anexa 16 (continuare)

1	2	3	4	5	6
Oxigen	O_2	0 20 50 100 150	273,15 293,15 323,15 373,15 432,15	0,02088 0,22320 0,02448 0,02736 0,03000	0,02428 0,02596 0,02847 0,03182 0,03489
Metan	CH_4	0 20 50	273,15 293,15 323,15	0,02600 0,02850 0,03200	0,03240 0,03315 0,03722
Vapori de apa	H_2O	100 200 300 400 500	373,15 473,15 573,15 673,15 773,15	0,02080 0,02820 0,03670 0,04740 0,06470	0,02419 0,03280 0,04268 0,05513 0,07525

Anexa 17

Puterile calorice H_s şi H_i ale unor gaze

Gazul	Formula chimică	Masa molară relativă (M)	Densitatea (ρ) kg/m_N^3	Puterea calorică	
				H_s kJ/m_N^3	H_i kJ/m_N^3
Acetilenă	C_2H_2	26,000	1,71000	58992	56940
Benzen	C_6H_6	78,050	3,49000	146371	140342
Etan	C_2H_6	30,050	1,35600	70422	64351
Hidrogen	H_2	2,0160	0,08987	12770	10760
Hidrogen sulfurat	H_2S+SO_3	34,080	1,53900	25707	23697
Hidrogen sulfurat	H_2S+SO_3	34,080	1,53900	30145	28135
Metan	CH_4	16,000	0,71680	39858	35797
Oxid de carbon	CO	28,000	1,25000		12644

Anexa 18

Valori medii orientative ale rugozității absolute, ε, în mm pentru conducte

Alamă, cupru aluminiu, material plastic, tras	**Nou întrebuințat**	**Până la 0,002 Până la 0,03**
Oțel - tras călțuit fără cusătură	Nou întrebuințat, ruginit	0,03 - 0,05 0,10 - 0,30
Oțel - sudat	Nou, bituminat Întrebuințat, ușor ruginit până la ușor cojit Valoare medie pentru conducte de abur și de presiune Valoare medie pentru conducte de gaz Valoare medie pentru conducte de transport Conducte pentru gaz de furnal Conducte pentru gaz de cocs și gaz de iluminat, ruginite Valoare medie pentru conducte de apă Conducte de apă, cu un mare grad de ruginire	0,05 - 0,20 0,20 - 0,50 0,20 - 0,40 0,20 - 0,40 0,50 - 1,00 1,00 - 2,00 1,00 - 3,00 0,40 - 1,20 1,50 - 3,00
Fontă	Nou, bituminat Nou, fără bitum Întrebuințat, ruginit Întrebuințat, ușor până la un grad mare de ruginire Valoare medie pentru conducte de apă și ape reziduale	0,10 - 0,20 0,30 - 0,40 1,00 - 1,50 1,50 - 3,00 1,00 - 3,00

Anexa 19

Valori ξ medii ale principalelor rezistențe locale

Curbe la 90°	Neted	Cutat	Ondulat	Segment sudat	Turnat
R = D+ 100	-	-	-	-	1,20 - 2,20
R = D	0,51	-	-	0,30	-
R = 2D	0,30	1,00	1,60	0,24	-
R = 3 D	0,27	0,70	1,40	-	-
R = 4 D	0,23	0,40	0,80	-	-
R = 5D	0,21	0,30	0,60	-	-
R = 6D	0,18	-	-	-	-
R = 10D	0,20	-	-	-	-

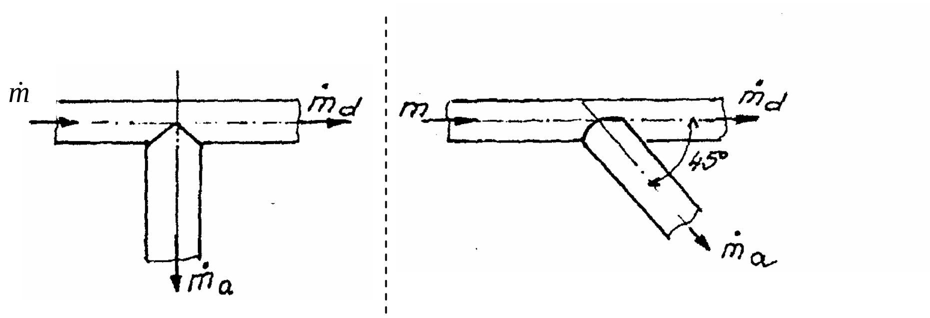
$$\text{Curbe la } \left\{ \begin{array}{l} 60^\circ = 80\% \\ 45^\circ = 65\% \\ 30^\circ = 45\% \\ 15^\circ = 20\% \end{array} \right\} \text{ din valorile precedente.}$$

Anexa 20

Compensator în formă de liră	Neted 0,7	Cutat 1,40
Compensator în formă de U	Neted 0,50	Cutat 1,00

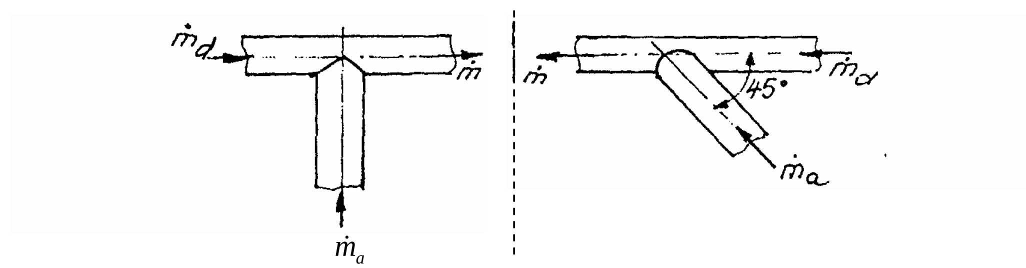
Anexa 21

Robinet cu ventil de trecere	Diametrul nominal mm						
	25	50	80	100	150	200	300
Cu trecere liberă (scaun oblic)	1,7	1,00	0,80	0,70	0,60	0,60	-
Tip normal (scaun drept)	-	-	-	2,70	2,00	1,40	1,00



Separarea curentului de fluid

$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}}$	ξ_a	ξ_d	ξ_a	ξ_d
0,00	0,95	0,04	0,90	0,04
0,20	0,88	0,08	0,68	0,06
0,40	0,89	0,05	0,50	0,04
0,60	*0,95*	0,07	0,38	0,07
0,80	1,10	0,21	0,35	0,20
1,00	1,28	*0,35*	0,48	0,33



Unirea curenților de fluid

$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}}$	ξ_a	ξ_d	ξ_a	ξ_d
0,00	1.,20	0,04	0,92	0,04
0,20	0,40	0,17	0,38	0,17
0,40	0,08	0,30	0,00	0,19
0,60	0,47	0,41	0,22	0,09
0,80	0,72	0,51	0,37	0,17
1,00	0,91	0,60	0,37	0,54

Anexa 22

Mărimile caracteristice ale unor gaze reale

Gazul		Masa molară M $kg/kmol$	Volumul molar $m_N^3/kmol$	Mărimile critice de stare			Volumul lichidului $10^3 \cdot v_0$ m^3/kg	$\frac{v_{cr}}{v_0}$
Denumire	Formula chimică			t_{cr} $^\circ C$	p_{cr} bar	$10^3 \cdot v_{cr}$ m^3/kg		
Acetilenă	C_2H_2	26,038	22,236	36,5	62,4	4,330	-	-
Aer	-	28,964	22,402	-140,7	37,66	3,227	1,261	2,56
Amoniac	NH_3	17,031	22,079	132,3	112,8	4,255	1,430	2,97
Argon	Ar	39,944	22,391	-122,4	48,6	1,920	0,699	2,75
Azot	N_2	28,016	22,404	-147,0	33,9	3,218	1,143	2,82
Benzen	C_6H_6	78,108	22,000	289	49,2	3,290	1,111	2,96
Bioxid de carbon	CO_2	44,01	22,262	31,04	73,9	2,143	0,843	2,54
Bioxid de sulf	SO_2	64,06	21,890	157,5	78,8	1,910	0,643	2,97
Etan	C_2H_6	30,07	22,168	32,2	48,8	4,930	-	-
Etilenă	C_2H_4	28,054	22,257	9,2	50,7	4,628	-	-
Heliu	He	4,003	22,430	-267,9	2,29	14,500	6,795	2,13
Hidrogen	H_2	2,016	22,432	-239,9	12,97	32,270	13,298	2,43
Hidrogen sulfurat	H_2S	34,08	22,150	100,4	90,1	2,865	-	-
Metan	CH_4	16,043	22,379	-82,1	46,4	6,176	-	-
Oxid de carbon	CO	28,011	22,408	-140,2	35,00	3,322	1,167	2,85
Oxid de azot	NO	30,008	22,391	-94,0	64,8	1,923	-	-
Oxigen	O_2	32,000	22,394	-118,4	50,8	2,325	0,799	2,91
Vapori de apă	H_2O	18,016	22,400	374,2	220,45	3,040	0,998	3,05

BIBLIOGRAFIE

1. Ivan, Fl., - *Bazele termodinamicii tehnice*, Editura Universității Pitești, 1998.
2. Ivan, Fl., Niculescu, R., - *Termodinamică tehnică. Seminar,* Editura Universității din Pitești, 2002.
3. Ivan, Fl., - Bazele termotehnicii. Partea I. Curs litografiat, Litografia Universității Pitești, 1995.
4. Ivan, Fl., Mitrache, I., - Probleme de termotehnică şi maşini termice pentru ingineri, Litografia Universității Pitești, 1994.
5. Mitrache, I., Ivan, Fl., Dumitrescu, V., - Termotehnică şi maşini termice. Partea a II-a – Maşini şi instalații termice. Litografia Universității Pitești, 1995.
6. Mălăncioiu, O., ş.a. – Termotehnică – probleme, Institutul Politehnic Bucureşti, 1987.
7. Radcenco, V., - Termotehnica şi maşini termice. Procese ireversibile. Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1976.
8. * * * Manualul inginerului termotehnician, vol. I şi II, Editura Tehnică, Bucureşti, 1961.
9. * * * Manualul inginerului termotehnician, vol. III, Editura Tehnică, Bucureşti, 1962.
10. Raznjevič, K., - Tabele şi diagrame termodinamice, Editura tehnică, Bucureşti, 1978.
11. Băran, N., ş.a. – Termotehnică – culegere de probleme, Institutul Politehnic Bucureşti, 1985.
12. Băran, N., Stanciu, D., - Termodinamică tehnică, Editura Matrix-Rom, Bucureşti, 2001.
13. Dănescu, Al., ş.a – Probleme de termotehnică, vol. I, I.P.B., 1984.
14. Popa, B., Vintilă, C., - Termotehnică şi maşini termice, E.D.P., Bucureşti, 1977.
15. Popa, B, Vintilă, C., - Termotehnică, maşini şi instalații termice, Probleme, E.D.P., Bucureşti, 1978.